



**Titre:** Étude de l'influence du mode de lubrification sur les performances d'usinage du composite à matrices d'aluminium.  
**Title:**

**Auteur:** Faramarz Dolatabadi  
**Author:**

**Date:** 2010

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Dolatabadi, F. (2010). Étude de l'influence du mode de lubrification sur les performances d'usinage du composite à matrices d'aluminium. [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/297/>  
**Citation:**

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/297/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de recherche:** Marek Balazinski  
**Advisors:**

**Programme:** Génie mécanique  
**Program:**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU MODE DE LUBRIFICATION SUR LES  
PERFORMANCES D'USINAGE DU COMPOSITE À MATRICES  
D'ALUMINIUM**

FARAMARZ DOLATABADI

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE MÉCANIQUE)

AVRIL 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU MODE DE LUBRIFICATION SUR LES  
PERFORMANCES D'USINAGE DU COMPOSITE À MATRICES  
D'ALUMINIUM**

présenté par : DOLATABADI Faramarz

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MASCLE Christian, Doc. ès sciences, président

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. AGARD Bruno, Doct., membre

## DÉDICACE

*À mon père pour ses histoires,*

*À ma mère pour ses gentilleses.*

*Je crois que l'intégralité de ce travail est le témoin de leur réussite.*

## REMERCIEMENTS

Je présente tout d'abord mes plus sincères remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Marek Balazinski, pour tout ce qu'il m'a appris, pour les conseils techniques qu'il m'a apportés lors de cette maîtrise et pour m'avoir guidé de manière patiente.

Je souhaite remercier tout particulièrement les personnels du laboratoire de recherche en fabrication virtuelle, Mme Mélissa Côté, M. François Ménard et M. Guy Gironne, pour leurs disponibilités, leurs aides, l'acquisition des compétences et des connaissances fondamentales sur les instruments de travail et de mesure.

Finalement, je tiens à remercier l'École Polytechnique de Montréal pour les ressources et pour m'avoir permis d'effectuer cette recherche.

## RÉSUMÉ

Les composites d'alliage d'aluminium ont des propriétés exceptionnelles, qui leur permettent d'avoir un vaste champ d'application industrielle. Le GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> est un composite à matrice d'alliage d'aluminium qui contient deux particules : le SiC et le graphite revêtu par une couche de nickel. Sa transformation, en particulier par usinage, est encore problématique. Ses particules, peuvent engendrer des problèmes d'usure abrasive sur l'outil de coupe, produire des rugosités de surfaces non contrôlables, un effort de coupe supérieur. Ce mémoire est consacré au sujet de la performance d'usinage du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> sous différents environnements. Cela n'a jamais été étudié auparavant, donc nos résultats sont un nouvel ouvrage dans ce domaine. Nous avons planifié une série d'essais par une méthode statistique en nous basant sur une approche descriptive. La performance du fraisage d'une pièce en GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> a été évaluée en déterminant l'influence des différents modes d'arrosage sur ses critères : la durée de vie de l'outil, l'effort de coupe et la rugosité de la surface usinée. Nos résultats pour le fraisage d'une pièce en GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> ont confirmé que :

- l'arrosage dans les deux modes appliqués (copieux et lubrification minimale) par rapport à l'usinage à sec augmente la durée de vie de l'outil et diminue la rugosité de la surface usinée. Dans la majorité des cas, la lubrification minimale, pour ces critères, est plus avantageuse que l'arrosage copieux;
- l'amélioration de la rugosité de la surface usinée sous la lubrification minimale est suffisamment importante pour choisir ce mode d'arrosage lorsque l'état de la surface est prioritaire;
- l'usinage sous arrosage (copieux et lubrification minimale) provoque une augmentation considérable de l'effort de coupe par rapport à l'usinage à sec;
- l'optimisation de la performance du processus d'usinage doit être réalisée en considérant seulement deux critères indépendants : la durée de vie de l'outil et l'effort de coupe;
- le critère le plus important pour diminuer le temps et le coût unitaire durant l'usinage est la durée de vie de l'outil;
- la performance d'usinage est dépendante du mode d'arrosage choisi. Son augmentation, d'un point de vue temps et coût unitaire d'usinage, est remarquable sous la lubrification minimale.

## ABSTRACT

The composite of aluminum alloys have exceptional properties which provide for them a wide industrial application. The GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> is an aluminum matrix composite which contains two particles, SiC and graphite coated with a layer of nickel. Its production in particularly by machining is still problematic. The particles can raise problems of abrasive wear on the cutting tool, surface roughness, high cutting force, and subsurface damage. This research is concerned to elucidate the performance of machining of GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> in different environments. We have planned a series of tests by a statistical method based on a descriptive approach. The milling performance of a piece of GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> was evaluated by determining the influence of different type of lubrication on performance criteria: tool life, cutting force and surface roughness. Our results for the milling of a piece of GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> have been confirmed:

-The Wet and MQL machining compare to the dry machining increases the tool life and improves the surface roughness. In most cases, the MQL during machining can improve tool life and surface roughness more than the wet machining.

-Improving the surface roughness under MQL is enough significant to be chosen in the cases where surface roughness has an important role.

-Wet and MQL machining compare to the dry machining greatly increases the cutting force.

-Optimizing the performance of the machining process is achieved by considering only two criteria: tool life and cutting force.

-The most important criterion in the sense of reduced time and the cost of production during machining is tool life.

-Performance of machining in sense of time and cost of production is dependent on the lubrication mode and will be increased significantly with the MQL machining.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
TABLE DES MATIÈRES .....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XVI
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1    REVUE DE LITTÉRATURE .....	6
1.1    Problème : génération de chaleur pendant l’usinage.....	7
1.2    Solutions : réduire la chaleur produite, refroidir la zone de coupe, établir les possibilités d’usinage aux températures élevées .....	13
1.2.1    Arrosage .....	13
1.2.2    Lubrification par film solide .....	32
1.2.3    Refroidissement cryogénique.....	34
1.2.4    Usinage à chaud .....	37
1.2.5    Usinage à grande vitesse .....	38
1.2.6    Modification de l’outil .....	40
1.2.7    Outil rotatif.....	43
1.2.8    Usinage associé à des vibrations ultra-soniques .....	44
1.3    Niveau d’application industrielle .....	45
1.4    Diminution des effets nocifs de l’arrosage.....	46



1.5	Critères de la performance d'usinage.....	47
1.6	Composite à matrice d'aluminium .....	47
1.7	Plan d'expérience, méthode Taguchi .....	52
1.8	Conclusion de la revue de littérature.....	52
CHAPITRE 2 DÉFINITION DU PROBLÈME ET LES OBJECTIFS.....		55
2.1	Définition du problème .....	55
2.2	Objectifs généraux.....	56
2.3	Objectifs spécifiques .....	57
2.3.1	Comparer les influences des différents modes d'arrosage sur la performance d'usinage .....	57
2.3.2	Établir une nouvelle méthodologie .....	58
2.3.3	Bâtir une séance de laboratoire .....	58
2.4	Type et méthode de recherche.....	59
CHAPITRE 3 PLAN D'EXPÉRIENCE.....		60
3.1	Méthode de la planification d'expérience .....	60
3.2	Obligation et limitation .....	61
3.3	Variables dépendantes.....	62
3.3.1	Durée de vie de l'outil.....	63
3.3.2	Effort de coupe .....	65
3.3.3	Rugosité de la surface .....	66
3.4	Variables indépendantes.....	68
3.4.1	Mode de lubrification .....	69
3.4.2	Vitesse de coupe.....	69
3.5	Variables bruits .....	70
3.6	Interaction des influences des variables indépendantes .....	71

3.7	Modélisation des réponses .....	71
3.8	Tableau des essais d'expérience.....	72
CHAPITRE 4 PRÉPARATION DE L'EXPÉRIENCE.....		74
4.1	Processus et conditions de coupe .....	74
4.2	Matériau usiné .....	75
4.3	Équipement et instrument.....	76
4.4	Nombre de répétitions .....	76
4.5	Ordonnancement des essais.....	77
CHAPITRE 5 ANALYSE DE DONNÉES ET DISCUSSION.....		79
5.1	Données.....	80
5.2	Analyse de données.....	81
5.3	Visualisation de données et discussion .....	95
5.3.1	Durée de vie de l'outil.....	95
5.3.2	Effort de coupe .....	98
5.3.3	Rugosité de la surface .....	98
CHAPITRE 6 OPTIMISATION .....		101
6.1	Optimisation de l'usinage.....	101
6.1.1	Cadence de production maximale .....	101
6.1.2	Coût minimal.....	103
6.1.3	Profit maximal.....	106
6.2	Valeurs des critères de la performance de coupe .....	107
6.3	Données financières .....	108
6.4	Optimisation.....	109
6.5	Discussion .....	115

6.6	Conclusion.....	120
	CONCLUSION .....	122
	RÉFÉRENCES.....	125

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Problèmes principaux causés par l'augmentation de la température dans la zone de coupe. ....	12
Tableau 1.2 : Additifs et leurs fonctions [56].....	18
Tableau 1.3 : Différents types de fluide de coupe.....	18
Tableau 1.4 : Sévérité d'usinage [43].....	19
Tableau 1.5 : Application des fluides de coupe [43].....	19
Tableau 1.6 : Matériau d'outil [99]. ....	41
Tableau 1.7 : Caractéristiques physique de GrA-Ni 10S.4G® [6].....	51
Tableau 3.1 : Déterminateur de tableau Taguchi [163].....	72
Tableau 3.2 : Tableau standard de Taguchi pour l'expérience .....	73
Tableau 5.1 : Données pour la durée de vie de l'outil.....	80
Tableau 5.2 : Données pour l'effort de coupe.....	80
Tableau 5.3 : Données pour la rugosité de la surface usinée .....	80
Tableau 5.4 : Définition des éléments et de leurs formules .....	81
Tableau 5.4 : Définition des éléments et de leurs formules .....	82
Tableau 5.5 : Définition des VI qui ont l'influence significative sur variation des VD .....	91
Tableau 5.6 : Pourcentage de variation attribuable à chaque source de variation .....	92
Tableau 5.7 : Réponses moyennes espérées pour chaque combinaison des conditions de coupe .	94
Tableau 6.1 : Frais machines et ses paramètres .....	104
Tableau 6.2 : Coût unitaire et ses éléments.....	106
Tableau 6.3 : Réponses moyennes espérées pour chaque combinaison des conditions de coupe	107
Tableau 6.4 : Valeurs des variables dépendantes prévues pour chaque combinaison des conditions de coupe.....	108

Tableau 6.5 : Valeurs du temps et du coût unitaire .....	113
Tableau 6.6 : Valeurs du temps et du coût unitaire pour la combinaison numéro 9 selon les valeurs expérimentales .....	114
Tableau 6.7 : Définition des VI qui ont l'influence significative sur variation de VD .....	118
Tableau 6.8 : Pourcentage de variation attribuable à chaque source de variation .....	119

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Zones de génération de chaleur [13].....	7
Figure 1.2 : Dispersion de chaleur en usinage [19].....	9
Figure 1.3 : Efforts de coupe et température pour un matériau utilisé pour les prothèses [70]. ....	11
Figure 1.4 : Température de la face de dépouille de l'outil [71].....	11
Figure 1.5 : Système de distribution du fluide de coupe .....	14
Figure 1.6 : Étapes de formation de la couche réactionnelle [50].....	16
Figure 1.7 : Durée de vie de l'outil avant rupture catastrophique [57]. ....	21
Figure 1.8 : Usure de la face de dépouille,.....	21
Figure 1.9 : Brouillard produit en arrosage copieux [47].....	24
Figure 1.10 : Système d'application du jet du fluide de coupe [62]. ....	24
Figure 1.11 : Schéma du système de jet spray [66].....	25
Figure 1.12 : Application du fluide de coupe par l'outil [67]. ....	26
Figure 1.13 : Influence des différents modes arrosage sur l'usure d'outil et la rugosité de la surface usinée [7]. ....	27
Figure 1.14 : Durée de vie de l'outil en fonction de $VB_{Bmax}$ [57].....	28
Figure 1.15 : Géométries des deux plaquettes utilisées [70].....	30
Figure 1.16 : Effet de la géométrie de plaquette sur la durée de vie de l'outil, (a) face plane, (b) face courbée [70]. ....	30
Figure 1.17 : Effet de la géométrie de la plaquette sur l'usure de face de coupe, (a) face plane, (b) face courbée [70]. ....	30
Figure 1.18 : Coûts d'usinage d'une pièce .....	31
Figure 1.19 : Aspects environnementaux aux processus d'usinage .....	32
Figure 1.20 : Système de lubrification par film solide [74]. ....	33
Figure 1.21 : État de la surface usinée .....	34

Figure 1.22 : Usure de la face de dépouille.....	34
Figure 1.23 : Schéma d'un système de refroidissement cryogénique de la zone de coupe [87]...	35
Figure 1.24 : Refroidir par l'arrière d'outil [89]. ....	36
Figure 1.25 : Refroidir par circulation [90].....	36
Figure 1.26 : Phénomène de Salomon [97]. ....	38
Figure 1.27 : Effort de coupe par UGV [98]. ....	39
Figure 1.28 : Angle de cisaillement par UGV [98]. ....	39
Figure 1.29 : Épaisseur de copeau par UGV [98]. ....	39
Figure 1.30 : Usure de l'outil par UGV [98]. ....	39
Figure 1.31 : Comportement thermique des matériaux d'outil [99]. ....	41
Figure 1.32 : Comparaison de l'efficacité des différents matériaux d'outil [100]. ....	41
Figure 1.33 : Influences probables du revêtement d'outil [101, 102]. ....	42
Figure 1.34 : Géométrie de l'arête de coupe [104]. ....	43
Figure 1.35 : Schéma d'un outil rotatif [105]. ....	44
Figure 1.36 : Outil rotatif pendant usinage [105]. ....	44
Figure 1.37 : Schéma de UAVU [108]. ....	45
Figure 1.38 : Effort de coupe en UAVU [107]. ....	45
Figure 1.39 : Rugosité de surface en usinage des CsMAIP (a) coupe des particules (b) enlèvement des particules [138]. ....	49
Figure 1.40 : (a) Schéma de l'abrasion d'outil, (b) deux effets différents des particules [15]. ....	49
Figure 1.41 : Micrographie du CMAIPA-SiC (lubrifiant solide : graphite revêtu par nickel) [128]. ....	51
Figure 2.1 : Coûts d'usinage [71]. ....	58
Figure 3.1 : Illustrations des différentes usures sur les deux plaquettes de l'outil.....	62
Figure 3.2 : Usure de l'outil et ses phénomènes [19]. ....	64

Figure 3.3 : Usure de la face de dépouille.....	64
Figure 3.4 : Efforts de coupe [19]. .....	66
Figure 3.5 : Efforts de coupe au fraisage [164].....	66
Figure 3.6 : Défauts de la surface usinée [19].....	67
Figure 3.7 : Schéma de la rugosité de la surface [99]. .....	68
Figure 5.1 : Durée de vie de l'outil pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage. ....	96
Figure 5.2 : Moyenne de la durée de vie de l'outil pour chaque niveau de VI. ....	96
Figure 5.3 : Moyenne de la durée de vie de l'outil pour chaque niveau en fonction de la vitesse de coupe. ....	96
Figure 5.4 : Effort de coupe pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage. .	99
Figure 5.5 : Moyenne de l'effort de coupe pour chaque niveau de VI. ....	99
Figure 5.6 : Moyenne de la durée de vie de l'outil pour chaque niveau en fonction de la vitesse de coupe. ....	99
Figure 5.7 : Rugosité de la surface pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage. ....	100
Figure 5.8 : Moyenne de la rugosité de la surface pour chaque niveau de VI. ....	100
Figure 5.9 : Moyenne de la rugosité de la surface pour chaque niveau en fonction de la vitesse de coupe. ....	100
Figure 6.1 : Coût unitaire en fonction des différents éléments [19].....	105
Figure 6.2 : Temps unitaire pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage. .	116
Figure 6.3 : Coût unitaire pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage. ....	116
Figure 6.4 : Moyenne du temps unitaire pour chaque niveau de VI. ....	117
Figure 6.5 : Moyenne du temps unitaire pour chaque niveau de VI. ....	118



## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

La liste des sigles et abréviations présente, dans l'ordre alphabétique, les sigles et abréviations utilisés dans le mémoire ou la thèse ainsi que leur signification :

CMM	Composite à matrice métallique.
CsMM	Composites à matrice métallique.
CMAI	Composite à matrice aluminium.
CsMAI	Composites à matrice aluminium.
CsMAIP	Composites à matrice aluminium et particules de renforcement.
CsMAIP-SiC	Composites à matrice aluminium et particules de renforcement de carbure de silicium.
CsMAIPA	Composites à matrice aluminium et particules de renforcement et de lubrifiant.
CsMAIPA-SiC	Composites à matrice aluminium et particules du renforcement de carbure de silicium et de lubrifiant.
GrA-Ni 10S.4G <sup>®</sup>	Composites à matrice aluminium et particules du renforcement de carbure de silicium et du lubrifiant de .
LM	Lubrification minimale.
ML	Mode de lubrification.
UAVU	Usinage associée par vibration ultrasonique.
VI	Variable indépendantes.
VD	Variables dépendantes.

## INTRODUCTION

Depuis quelques décennies, les nouveaux matériaux (composites, hybrides, nanomatériaux) changent entièrement le visage de l'industrie mondiale. Les industries spatiales, aéronautiques et automobiles sont à l'avant-garde dans cette révolution industrielle. La création de nouveaux matériaux, jour après jour, restreint le domaine d'utilisation des anciens matériaux. Les métaux et les alliages métalliques sont remplacés dans beaucoup d'applications traditionnelles par des composites à matrice métallique (CsMM). Il s'agit d'alliages métalliques renforcés par des particules ou fibres de matériaux très légers et très résistants [1]. Les renforcements courants pour les CsMM sont généralement des particules de carbure de silicium (SiC) et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), parfois de borure de titane ( $\text{TiB}_2$ ), de carbure de titane (TiC) et de carbure de bore ( $\text{B}_4\text{C}$ ) alors que les matériaux qui constituent la plupart des matrices sont en aluminium, en titane et en magnésium [1-5].

Les composites à matrice aluminium (CsMAI) sont les plus connus et les plus commercialisés des CsMM à cause de leur facilité de production, de leur prix et de leurs propriétés mécaniques. Le nouveau genre de CsMAI est constitué de deux particules différentes (CsMAIP) : des particules de graphite revêtu par du nickel et des particules d'un matériau très dur ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC, etc.). Ces CsMAI ont des propriétés autolubrifiantes (CsMAIPA ou GrA-Ni<sup>®</sup>) grâce aux particules des graphites. Ils ont également des résistances à l'usure très élevées en raison des particules de renforcement et des liaisons métalliques entre le nickel et l'aluminium. Les GrA-Ni<sup>®</sup> sont conçus pour les applications suivantes : (1) taux d'usure faible; (2) poids léger et haute conductivité thermique nécessaires; (3) présence d'un lubrifiant sec souhaitée. Les couches supérieures des cylindres, des pistons, des différents types de freins et diffuseurs d'air peuvent être des applications pour les GrA-Ni<sup>®</sup> [6]. Ces matériaux, à cause de la nature de leurs particules, peuvent produire divers problèmes au cours d'un processus d'usinage comme : (1) grande usure abrasive sur l'outil de coupe; (2) rugosité de la surface usinée non contrôlable; (3) effort de coupe supérieur; (4) endommagement subsurfacique.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons considéré l'arrosage comme un moyen d'éliminer ou, au minimum, de diminuer ces problèmes. Nous avons essayé de trouver le mode d'arrosage le plus efficace sur la performance d'usinage en considérant ses effets nocifs (économique, santé, environnement).

Le présent mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, les notions suivantes sont explorées :

1. problème de la génération de chaleur pendant l'usinage;
2. solutions existantes pour diminuer ou transférer la chaleur produite pendant l'usinage, avantages et désavantages de chaque solution;
3. détermination du niveau d'application des différentes solutions en industrie et définition de la solution la plus commune.

Nous constatons que le plus connu et le plus commun des moyens pour diminuer la chaleur produite dans la zone de coupe et pour la transférer est l'arrosage de coupe. Donc, nous envisageons de trouver :

1. les moyens pour diminuer les effets nocifs du fluide de coupe (problème de santé des ouvriers, contamination environnementale et coût élevé);
2. les critères de la performance d'usinage.

L'étude de la tendance d'utilisation des nouveaux matériaux (composite, CsMM, CsMAI) par l'industrie alors qu'ils ont un comportement compliqué et non linéaire est l'étape suivante. Ensuite, l'étude de l'application du plan d'expérience et particulièrement de la méthode Taguchi pour planifier des expériences sur l'usinage est abordée. La conclusion de ce chapitre présente les connaissances actuelles de l'influence du mode d'arrosage sur la performance de coupe du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>.

Le deuxième chapitre présente une définition du problème, ainsi que le processus et les conditions expérimentales choisies pour réaliser les essais. Elles doivent satisfaire les trois objectifs initiaux et fondamentaux de notre recherche qui sont les suivants :

1. Comparer les influences des différents modes d'arrosage sur la performance de l'usinage du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>.
2. Établir une nouvelle méthodologie (optimisation du processus d'usinage en considérant l'effet écologique de l'arrosage) pour évaluer et comparer l'influence du mode d'arrosage sur la performance d'usinage. Le but final est d'optimiser le processus d'usinage économiquement.

3. Un des buts principaux de cette recherche est de bâtir une séance de laboratoire qui présentera un point de vue écologique sur l'arrosage pendant l'usinage. Les conditions d'essais sont choisies dans ce but. La limitation du temps ainsi que la capacité de refaire nos essais pendant une séance de laboratoire nous obligent à faire des essais dans des conditions non réelles (non industrielles). Mais le but principal est que la méthodologie établie puisse être utilisée dans les conditions réelles et industrielles.

Les deux derniers objectifs de notre recherche nous obligent à faire les essais dans des conditions non réelles, donc nous sommes amenés à :

1. Faire les essais de surfacage avec un outil qui possède seulement une arête de coupe (ce qui n'est jamais le cas pour le surfacage en industrie). Cette limitation simplifie l'analyse des résultats (absence d'hétérogénéité d'usure ainsi que des différentes influences des plaquettes sur la surface usinée).
2. Faire les essais avec une plaquette de géométrie très simple qui nous donne deux grands avantages. Premièrement, éviter les effets interactionnels inconnus entre le mode d'arrosage et les différents paramètres géométriques de la plaquette. Ces effets interactionnels seraient observés comme des variables bruits et changeront probablement les résultats de l'analyse des données de notre expérience. Deuxièmement, se concentrer uniquement sur les phénomènes primaires liés à la coupe.
3. Faire les essais avec une plaquette sans revêtement. Cela n'est pas utilisé dans l'usinage industriel des pièces en CsMAIP-SiC (dans l'industrie l'usinage de CsMAIP-SiC est effectué par la plaquette de CBN ou PCD qui donnent une durée de vie nettement supérieure par rapport à nos essais). Ce choix nous permet de diminuer fortement le coût et le temps nécessaire pour réaliser notre expérience, sans négliger le premier objectif fondamental de notre recherche. Il nous permet ainsi de donner aux étudiants du laboratoire "d'usinage écologique" la possibilité de faire les essais au cours de deux séances de quatre heures, ce qui est acceptable.

Dans le troisième chapitre, en se basant sur le contenu du chapitre 1 et du chapitre 2, nous avons produit un plan d'expérience, les étapes suivies sont : sélection des variables dépendantes et des variables indépendantes, identification des variables bruits, détermination de l'intervalle étudié des différentes variables, détermination des niveaux des variables indépendantes, identification

des interactions, modélisation des réponses. Ce plan d'expérience est réalisé par la méthode Taguchi. Une justification de l'orthogonalité du plan d'expérience vis-à-vis des modèles des réponses est également réalisée.

Le quatrième chapitre exprime les études et les activités que nous avons faites avant de commencer la procédure expérimentale. Il contient les actions suivantes :

1. choisir les équipements nécessaires pour réaliser les essais du plan d'expérience et connaître leurs fonctions;
2. choisir les instruments de mesure des variables dépendantes et déterminer leurs caractéristiques;
3. faire une pré-étude pour connaître l'écart-type de la variabilité naturelle des réponses;
4. définir le nombre de répétitions nécessaires pour avoir un niveau de confiance à 95 %;
5. préparer l'organisation des essais du plan d'expérience pour diminuer leur coût et leur temps de réalisation.

À la suite de ces activités, nous avons réalisé les essais du plan d'expérience, collecté les données et les transférées à la format nécessaire pour analyser.

La première partie du cinquième chapitre présente le processus d'analyse de données afin de :

1. déterminer les variables indépendantes qui ont des effets significatifs sur la moyenne des variables dépendantes;
2. définir les effets des variables indépendantes sur les variables dépendantes et comparer le pourcentage de la contribution de chaque variable indépendante à la variabilité d'une variable dépendante;
3. trouver les formules statistiques qui prédisent la valeur d'une variable dépendante par rapport aux combinaisons des variables indépendantes;
4. déterminer les interactions entre les facteurs et évaluer leurs influences sur une variable dépendante;
5. spécifier les pourcentages d'erreur des valeurs calculées par rapport aux valeurs expérimentales des variables dépendantes.

La deuxième partie de ce chapitre exprime les discussions détaillées sur les résultats de la première partie.

Le moyen de trouver les conditions de coupe qui optimisent le processus de fraisage est discuté au sixième chapitre. Pour obtenir une réponse dans ce chapitre, on est obligé d'utiliser différentes données financières déterminées pour correspondre à un cas industriel général. Après la confirmation des résultats de l'expérience dans la dernière partie du chapitre 7, on présente les conclusions de cette recherche dans le chapitre de conclusion.

## CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

### Introduction

Tout d'abord, il est nécessaire d'effectuer une étude préliminaire afin de bien connaître le sujet. Dans notre cas, elle consiste en la connaissance de base de l'usinage, du problème principal de chaleur produite, des effets de cette chaleur et les solutions existantes pour y pallier. Un résumé de cette étude est présenté ci-dessous.

L'usinage est un procédé de fabrication mécanique par enlèvement de copeaux faisant intervenir deux mécanismes physiques de base : la déformation plastique au sein du copeau et le frottement à l'interface outil-pièce-copeaux.

Une partie de l'énergie consommée pour la fabrication de la pièce est dispersée dans la zone de coupe à cause des frottements. Ce phénomène ainsi que la déformation plastique des matériaux pendant la coupe entraînent une génération de chaleur qui augmente la température de l'outil et de la pièce, ce qui engendre trois problèmes [7, 8] :

1. le raccourcissement de la durée de vie de l'outil;
2. le changement des caractéristiques mécaniques de la pièce dans la zone de coupe;
3. le soudage des matériaux de la pièce sur l'outil, dû à la haute température et aux contraintes élevées, qui forment des amas métalliques sur l'arête de l'outil. La conséquence principale est la création d'un mauvais état de surface de la pièce.

Pour éviter les problèmes mentionnés ci dessus, il faut [8, 9] :

1. refroidir l'outil et la pièce pour combattre les effets non désirables de la chaleur produite pendant l'usinage;
2. diminuer le frottement dans la zone de contact outil-pièce-copeaux par la lubrification de la coupe.

Les connaissances de base acquises nous donnent l'habilité de poser la question de recherche :

- Quel est le moyen pratique et économique de refroidissement et de lubrification du processus d'usinage d'un CsMAIPA-SiC (GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>)?

## 1.1 Problème : génération de chaleur pendant l'usinage

Pendant le processus de coupe, le travail s'effectue dans trois zones : (1) l'outil effectue l'action de coupe en surmontant la force de cisaillement du matériau usiné; (2) le copeau se forme et se déforme lors du mouvement sur la face de coupe de l'outil; (3) la surface finie de la pièce rentre en contact avec la face de dépouille de l'outil [10-12].

Il est maintenant admis que presque tous les travaux accomplis pendant le processus d'usinage sont convertis en chaleur (la partie d'énergie qui produit les contraintes emmagasinées dans les copeaux et le matériau usiné est négligeable). Les auteurs N. A. Abukhshim & P. T. Mativenga & M. A. Sheikh (2006) [ 13] classifient les principales zones où se crée la chaleur au cours d'un processus de coupe orthogonal et les présentent comme les suivantes [10, 13-16]:

1. Tout d'abord, dans le plan de cisaillement, pendant la déformation primaire, la chaleur se crée en raison de la déformation plastique des matériaux (figure 1.1). La plupart de l'énergie de coupe est consommée dans cette zone. C'est donc qu'il y a un échauffement localisé très important qui donne une très haute température au copeau. Le matériau est alors adouci, ce qui permet une plus grande déformation de ce matériau.

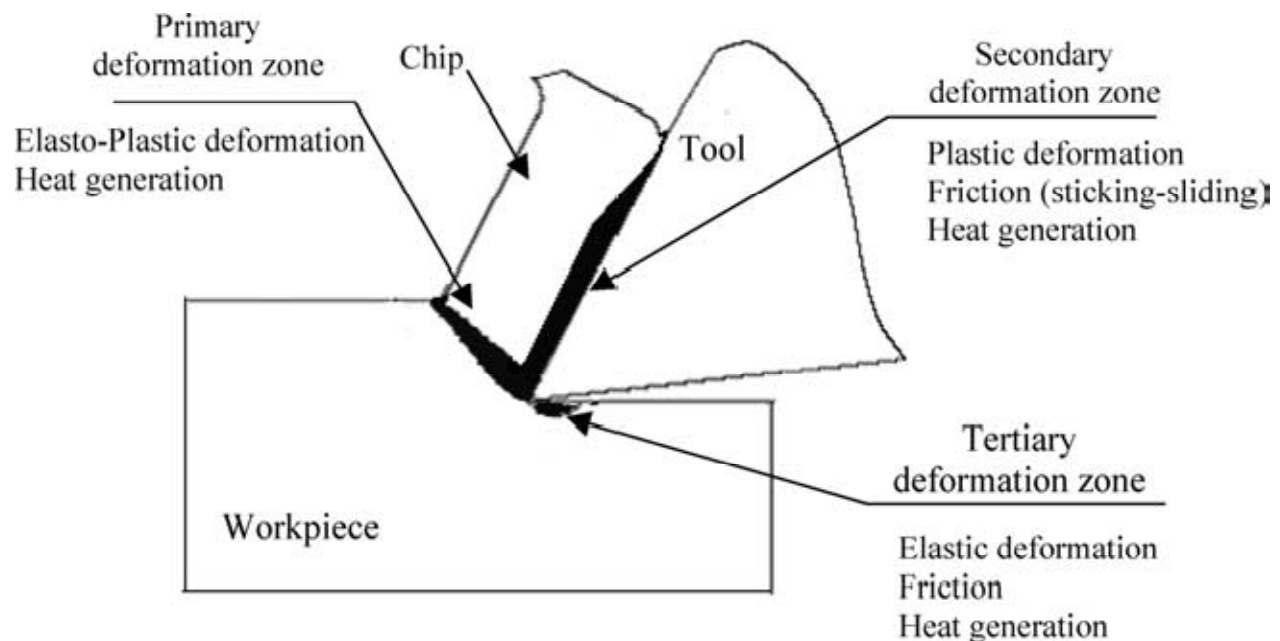


Figure 1.1 : Zones de génération de chaleur [13].



2. Dans la deuxième zone, le copeau déjà chauffé doit passer sur la face de coupe de l'outil. Cela fait intervenir deux phénomènes : (1) grippement et (2) glissement. Dans la partie de grippement le copeau subit une seconde fois des déformations plastiques. Ce phénomène ainsi que le travail nécessaire pour surmonter le frottement à la zone de l'interface d'outil-copeau produisent la chaleur (second accroissement de sa température).
3. Enfin, la zone du contact entre la face de dépouille de l'outil et la surface finie du matériau usiné où des travaux sont effectués pour surmonter la friction et pour la déformation élastique.

N. A. Abukhshim & P. T. Mativenga (2006) [13] constatent que la génération de chaleur dans la première zone et la zone secondaire est fortement dépendante des conditions de coupe. La génération de chaleur dans la troisième zone est fortement influencée par l'usure de la face de dépouille de l'outil.

En résumé, selon les auteurs, la distribution des quantités de chaleur produites dans les trois zones mentionnées est tributaire de la combinaison des propriétés physiques et chimiques du matériau usiné, des conditions de coupe, du matériau de l'outil de coupe, de sa géométrie et de son revêtement. D'après E. M. Trent (1988) [12] et A. O. Tay & M. G. Stevenson (1974) [17] pour un matériau non abrasif pendant le processus de tournage (copeau continu) avec une vitesse de coupe moyenne, la chaleur produite dans la deuxième zone représente de 20 à 35 % de la chaleur produite dans la première zone. Sachant que 60 à 80 % de la chaleur totale est produite dans la première zone, on détermine que la production de chaleur dans la deuxième et la troisième zone est respectivement d'environ 15-25 % et 5-15 % de chaleur produite totale. H. Ay & W. J. Yang (1998) [18] ont classé la production et la distribution de chaleur en trois étapes : absorption, transition et stabilisation. Au début, l'énergie transférée est absorbée, ce qui entraîne une augmentation rapide de la température locale. Lors de la phase de transition, l'énergie absorbée va augmenter l'enthalpie et ensuite se diffuser partiellement. Finalement, de l'enthalpie élevée du système résulte une augmentation exponentielle de la température locale. La chaleur produite se disperse dans les copeaux, le matériau usiné et l'outil de coupe et elle augmente leur température. Le rapport de la dispersion de chaleur entre les trois éléments (copeau, matériau et

outil) dépend de la combinaison des propriétés du matériau usiné, des caractéristiques de l'outil de coupe et des conditions de coupe.

La figure 1.2 présente un schéma général de la dispersion de chaleur.

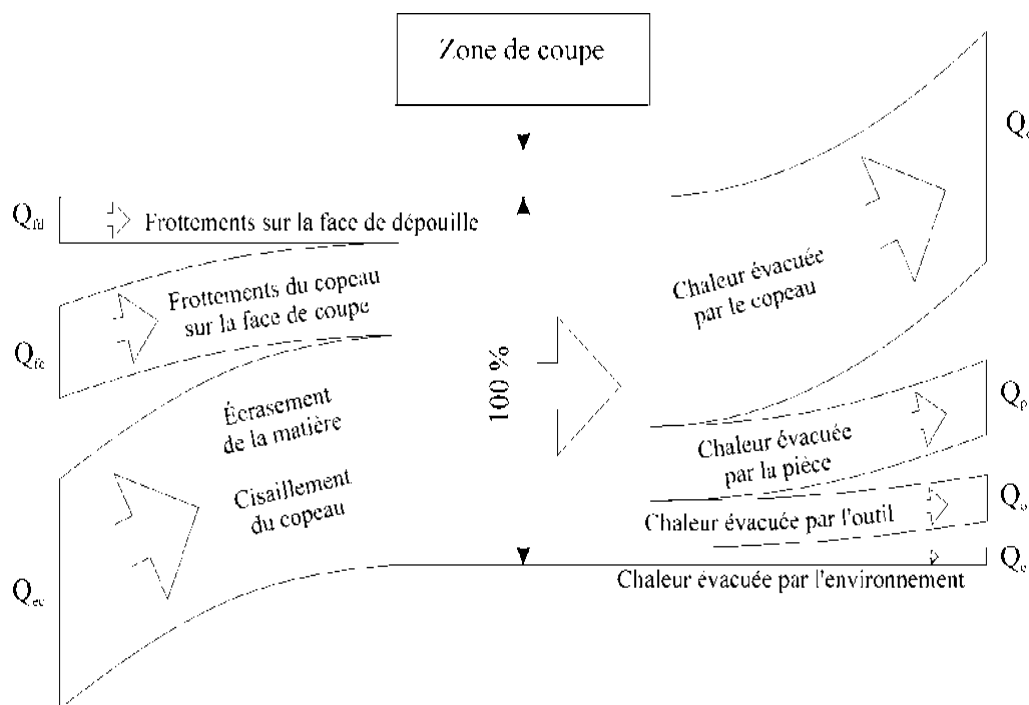


Figure 1.2 : Dispersion de chaleur en usinage [19].

En 2002, K. M. Vernaza-Pena & J. J. Mason [20] ont trouvé que pour un alliage d'aluminium avec un débit de copeaux très faible, environ 50 % de la chaleur produite dans la zone de cisaillement se transfère au matériau usiné. Ce ratio, pour un débit de copeaux élevé, est entre 10 et 15 %. Le reste, 85 %, va être transféré au copeau et le chauffe fortement.

Le comportement thermique dans la zone de coupe est affecté considérablement par les facteurs suivants :

1. résistance du matériau usiné [21];
2. dureté du matériau usiné [22];
3. capacité thermique massique du matériau usiné [12, 21];
4. conductivité thermique du matériau usiné [21, 23];

5. débit de copeau (vitesse de coupe, largeur de coupe, profondeur de coupe) [11, 13, 22, 23].

Plusieurs chercheurs ont étudié le transfert de chaleur pendant le passage du copeau en deuxième zone. Selon eux, les facteurs qui ont un effet important sur la production et le transfert de chaleur dans cette zone sont :

1. vitesse de glissement (vitesse de coupe) [13, 23-27];
2. taux de génération de chaleur (coefficient de frottement, force normale, etc.) [24-27];
3. température de l'interface de contact copeau-outil, une augmentation de la température de cette interface augmente le coefficient de frottement [28, 29];
4. propriétés thermiques des matériaux en contact (conductivité thermique, capacité thermique massique, etc.) [21];
5. longueur de l'interface de contact [24-27];
6. surface effective de contact [24-27].

M. Bacci da Silva & J. Wallbank (1999) [10] ont montré que la probabilité de transfert de chaleur du copeau à l'outil est faible : les températures sur la face de coupe de l'outil sont supérieures à celles présentes dans le copeau. I. Korkut & M. Boy (2007) [23] ont bien expliqué la raison de cette température plus élevée dans l'outil : le copeau se déplace très rapidement à proximité de la face de la coupe de l'outil (la masse de copeau produite par unité de temps est plus grande que la masse de la plaquette ou de l'outil). Par conséquent, le copeau aura une capacité thermique plus grande que celle de l'outil. Donc sa température sera inférieure à celle de l'outil de coupe. La grande capacité thermique du copeau lui permet d'absorber la plus grande partie de la chaleur produite et de la transférer à l'extérieur de la zone de coupe (exception : pendant l'usinage de certains matériaux tels que le titane et les alliages de base nickel, la plupart de la chaleur produite est transférée dans l'outil en raison de leur faible conductivité thermique). Généralement, seulement une petite partie de la chaleur totale est transférée dans l'outil de coupe.

Lorsque nous étudions la chaleur produite, la troisième zone de coupe est généralement très peu importante (exception : un matériau abrasif avec vitesse de coupe très haute et une profondeur de coupe très petite, etc.). Mais en pratique, l'usure de la face de dépouille de l'outil est très importante : elle influence fortement la rugosité de la surface finie de la pièce. Elle est utilisée

très souvent pour déterminer la durée de vie de l'outil. Le nombre de recherches qui traite du dégagement et de la distribution de chaleur pendant la coupe interrompue est limité à cause de la complexité de ce problème. La chaleur produite au cours de la coupe interrompue est un facteur très influent sur la durée de la vie d'outil [30]. La chaleur est générée de la même manière, mais les variations de la température sont cycliques : augmentation au cours du temps d'engagement de l'outil dans la pièce et diminution durant le temps de dégagement. Cette fluctuation thermique augmente la fatigue de l'outil de coupe et contribue à accroître la probabilité d'une usure catastrophique [21]. Les figures 1.3, a, b et 1.4, a, b, c montrent les deux exemples de la variation de la température de l'outil de coupe au cours d'un processus de fraisage [31],[32].

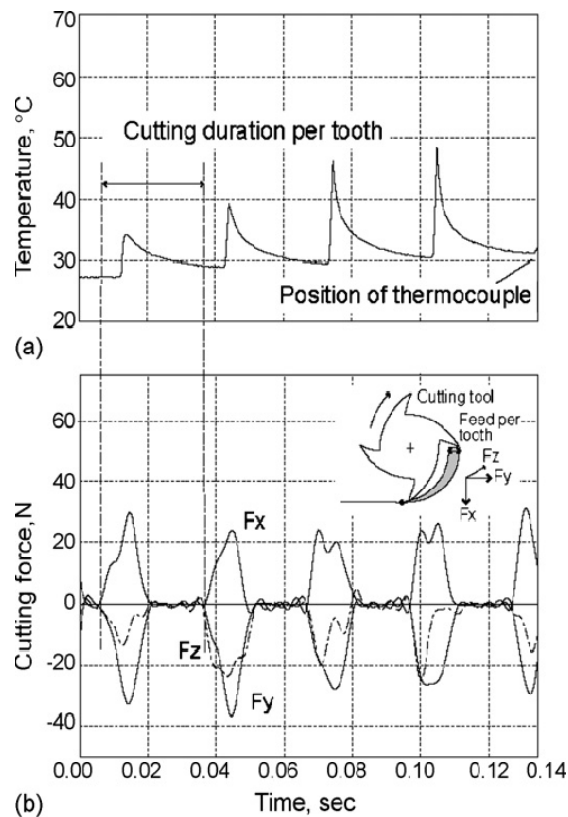


Figure 1.3 : Efforts de coupe et température pour un matériau utilisé pour les prothèses [70].

Fraisage en concordance, Vitesse de coupe = 31.4 m/min, Avance par dent = 0.25 mm, Profondeur de coupe = 5 mm

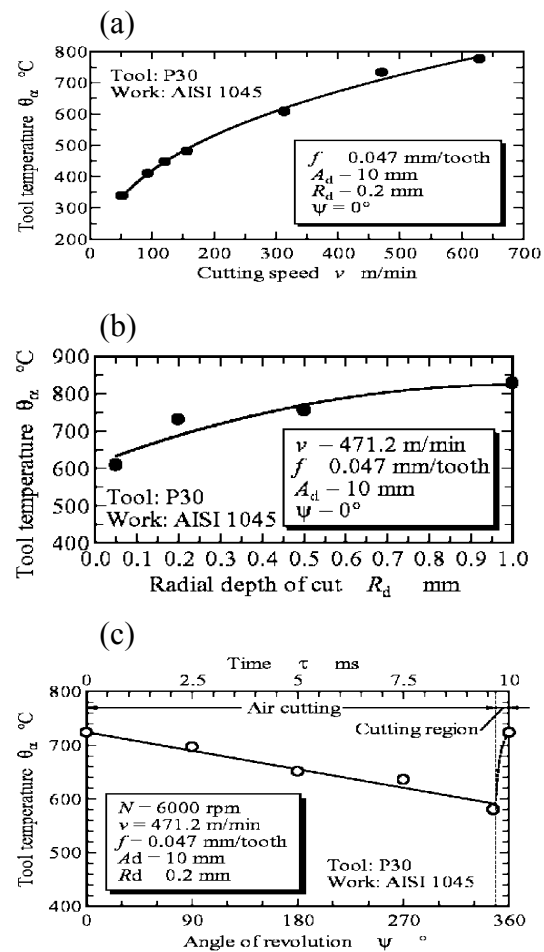
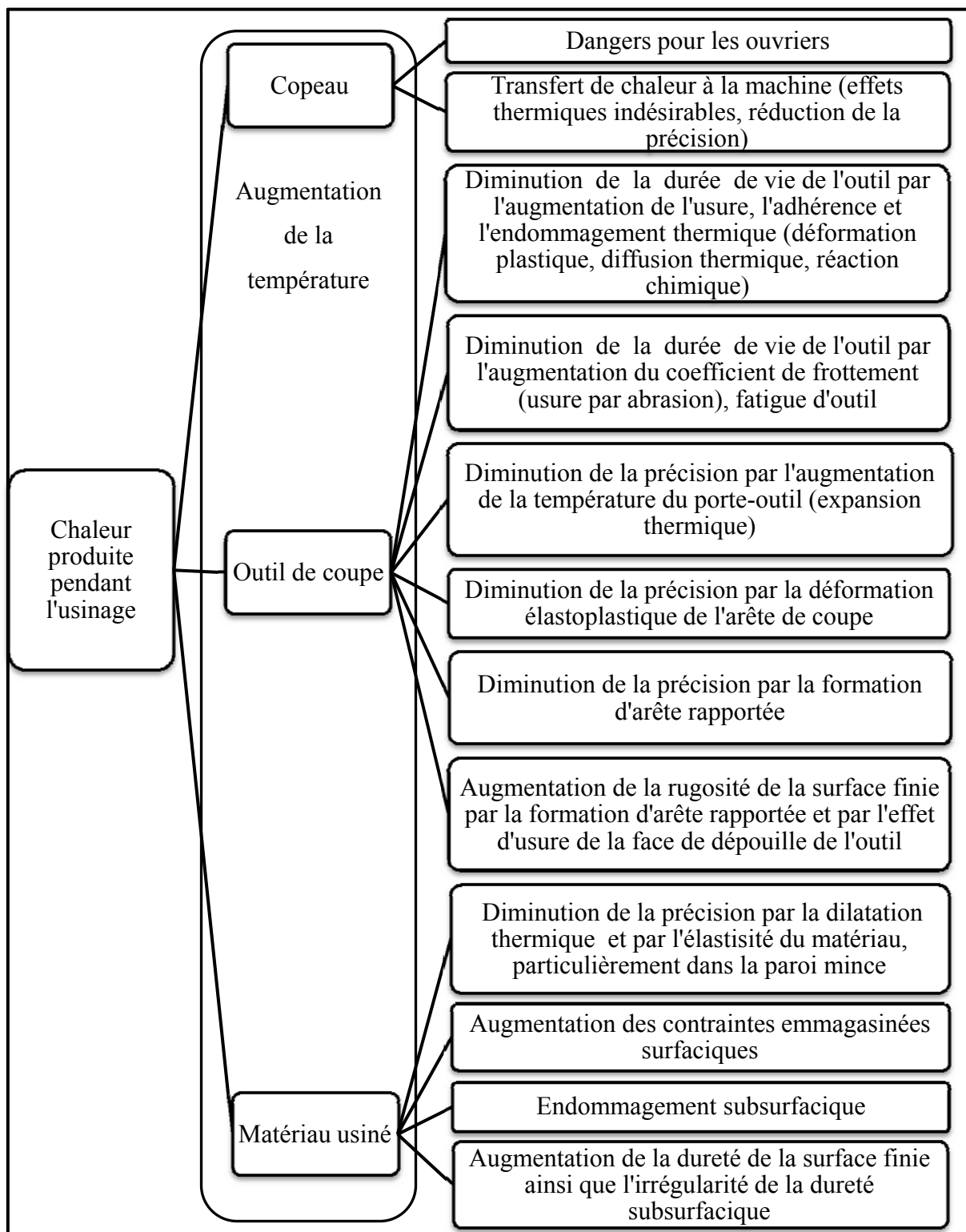


Figure 1.4 : Température de la face de dépouille de l'outil [71].

Pendant l'usinage, une forte augmentation de la température peut mener aux problèmes variés présentés dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Problèmes principaux causés par l'augmentation de la température dans la zone de coupe.



## **1.2 Solutions : réduire la chaleur produite, refroidir la zone de coupe, établir les possibilités d'usinage aux températures élevées**

Il y a plusieurs solutions possibles pour éliminer ou diminuer les effets de la chaleur produite dans la zone de coupe.

Le premier concept est la réduction de la chaleur produite. Ce concept, en considérant la nature du problème, nous donne deux choix : (1) diminution de la quantité de travail effectué pour la déformation plastique du matériau pendant l'usinage (diminution de la résistance au cisaillement du matériau, du taux de déformation plastique, etc.); (2) abaissement du taux de frottement (diminution de : la force normale appliquée sur l'interface de contact, coefficients de frottement, longueur de contact, etc.). Le deuxième concept considéré est le refroidissement de la zone de coupe (ensemble des deux actions d'absorption et de transfert de la chaleur produite). Le refroidissement de la zone de coupe peut être réalisé par deux manières : (1) injection d'un élément dans la zone de coupe pour absorber la chaleur puis récupération et remplacement (peut être fait par circulation), (2) modification du processus ou des éléments participant au processus dans le but de disperser le plus de chaleur dans les copeaux.

Le troisième concept est fondé sur les récentes innovations dans les domaines technologiques et matériaux qui établissent des possibilités d'usinage aux températures élevées.

Selon ces trois concepts principaux, nous avons trouvé les solutions pratiques. Elles peuvent être dissociées en huit catégories : (1) arrosage; (2) lubrification par film solide; (3) refroidissement cryogénique; (4) usinage à chaud; (5) usinage à grande vitesse; (6) modification d'outil; (7) outil rotatif; (8) usinage associé à des vibrations ultra-soniques.

### **1.2.1 Arrosage**

L'arrosage permet de maîtriser la température dans la zone de coupe. Un fluide pénètre dans la zone de coupe afin de diminuer, d'absorber et de transférer la chaleur produite.

La figure 1.5 [33] montre le schéma d'un système de distribution du fluide de coupe.

Les deux fonctions principales d'un fluide de coupe, d'après M. A. El Baradie (1996) et M. Stanford & P. M. Lister (2002) [34, 35], sont :

1. Réduire la quantité de chaleur. Premièrement, en diminuant la quantité de travail nécessaire pour surmonter la contrainte du cisaillement de matériau usiné et deuxièmement, en lubrifiant les interfaces de contact entre pièce-outil et outil-copeau (réduction du coefficient de frottement).
2. Refroidir la zone de coupe. En augmentant la vitesse de coupe, l'unité de temps pour la pénétration du lubrifiant dans la zone de coupe est réduite. Par conséquent, les effets de la lubrification du fluide de coupe diminuent et la quantité de chaleur produite augmente. Dans cette situation, le rôle du fluide de coupe est plus de refroidir que de lubrifier (il doit refroidir l'outil, le copeau et la pièce).

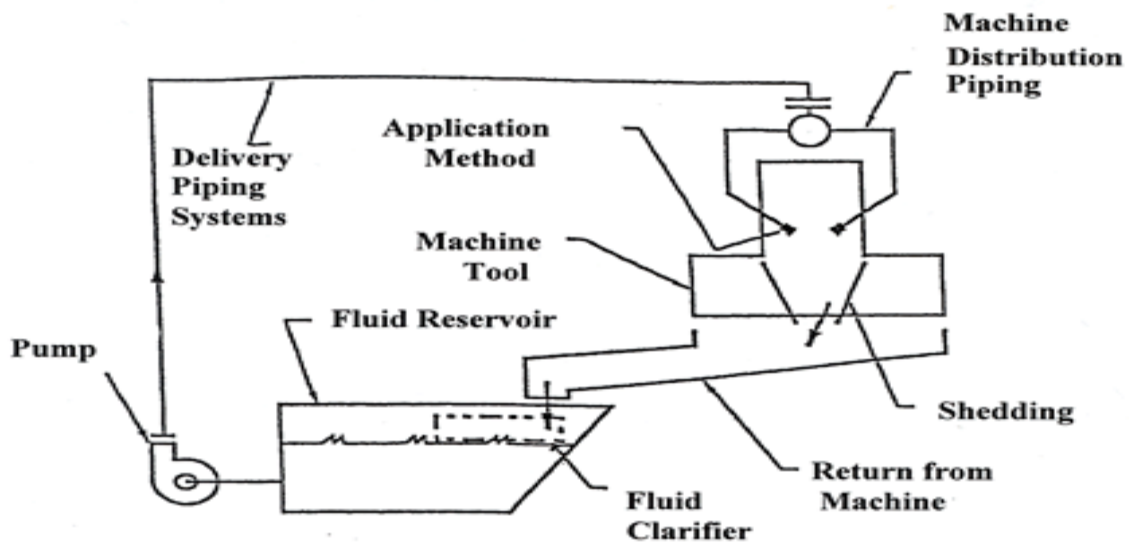


Figure 1.5 : Système de distribution du fluide de coupe  
source : <http://www.dol.gov/>, (U.S. Département de Labor) [72].

Les autres chercheurs confirment ces deux fonctions et présentent d'autres fonctions pour le fluide de coupe :

1. Évacuation des copeaux [8, 36]. Ce rôle est essentiel pour certains processus de coupe. En particulier le perçage, qui nécessite un arrosage sous pression (jet du fluide) afin de chasser les copeaux hors du trou. Sans fluide ou avec fluide, mais sans pression suffisante, les copeaux peuvent se souder dans le trou, la rugosité de la surface usinée augmente et la stabilité du système baisse [37, 38].
2. Formation des copeaux. La formation du copeau est également affectée lorsque le fluide de coupe est appliqué au cours d'une opération d'usinage. L'arrosage modifie le roulage

de copeau qui change son épaisseur ainsi que le gradient de température dans le corps du copeau. La direction dans laquelle le fluide de coupe est appliqué est un facteur important pour le roulage de copeau. La forme du roulage de copeau affecte la taille et la profondeur maximale d'usure sur la face de coupe de l'outil. L'effet combiné de la taille et de l'emplacement de la profondeur maximale d'usure sur la face de coupe de l'outil a une influence essentielle sur la durée de vie de l'outil [36, 39].

3. Réduction de la formation de l'arête rapportée [36, 40, 41]. D'après l'auteur du livre "Metalworking Fluids" (2006) [36], l'utilisation de fluide de coupe diminue le soudage de copeau sur la face de coupe de l'outil (arête rapportée) et l'usure par l'adhérence.
4. Absorption de la poussière et du brouillard de métal pendant l'usinage [42, 43]. I. Zaghbani & V. Songmene, & R. Khettabi (2009) [42] ont bien indiqué que la zone de cisaillement (principalement la première zone) est la principale source d'émission de poussières au cours de l'usinage. Ils ont constaté que cette émission est considérablement influencée par les conditions de la déformation (vitesse de cisaillement, contrainte de cisaillement, taux de compression de copeau et mode d'arrosage). Le fluide de coupe absorbe une grande partie des poussières et du brouillard (aucun effet sur les nanoparticules), mais il augmente la densité d'émission des particules de liquide [42, 44]. Les différentes influences du fluide de coupe sur l'émission de poussière et de brouillard ont été rapportées [44-48]. Les résultats sont variés, mais tous les auteurs admettent les effets du fluide de coupe sur l'émission de poussière et de brouillard (diminution ou augmentation).
5. Inhibition de la corrosion [36, 49-52]. Selon G. Foltz (2003) [53], la corrosion peut se produire à tout moment au cours de la vie d'un métal, mais elle peut s'accélérer lorsque la température et l'humidité relative sont élevées (les conditions d'une opération d'usinage). La protection contre la corrosion et la rouille est possible avec l'ajout d'additifs au fluide de coupe. Les additifs sont sélectionnés selon le type de métal impliqué, les fonctions recherchées du fluide de coupe, etc.

M. A. El Baradie (1996) [34] a présenté trois propriétés nécessaires que doit avoir un fluide de coupe acceptable : (1) haute conductivité thermique, (2) haute chaleur spécifique, (3) haut pouvoir lubrifiant. Selon G. Boothroyd & W. A. Knight (2006) [54] et E. Brinksmeier & D. A. S



Lucca (2004) [50], le fluide de coupe, pour répondre à la propriété de lubrification, doit avoir les trois caractéristiques suivantes :

1. Avoir des molécules de petites tailles pour être capable de se diffuser rapidement et de pénétrer dans l'interface outil-copeau.
2. Contenir un composant réactif approprié (généralement additif EP) qui réagit avec la surface du métal usiné et forme une couche réactionnelle de faible résistance au cisaillement. Celle-ci devient un lubrifiant à la couche limite (épaisseur de quelques molécules). Cette couche à basse température lubrifie et protège la surface de métal usiné contre la corrosion et l'oxydation (interface outil-pièce). La figure 1.6 montre les étapes de formation de la couche limite.
3. Être suffisamment instable pour se décomposer aux températures et aux pressions existantes à l'interface outil-copeau (séparation de la partie organique de la molécule). Après cette décomposition, les parties inorganiques établissent une liaison métallique avec les métaux (outil et matériau usiné) et forment un film mince sur leurs surfaces. Aux températures plus élevées de l'interface outil-copeau, le film mince s'amollit. Cet amollissement diminue la résistance du cisaillement de cette couche et par conséquent réduit le frottement dans la zone de contact.

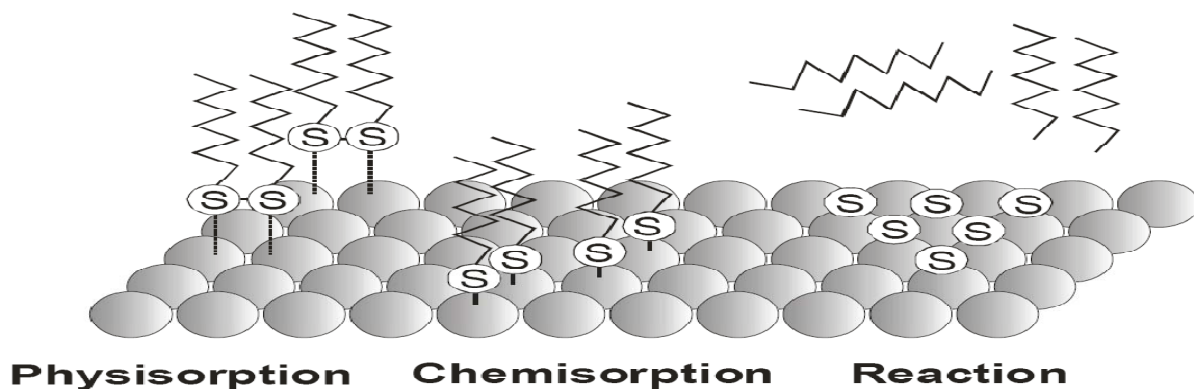


Figure 1.6 : Étapes de formation de la couche réactionnelle [50].

L'eau remplit les deux premières exigences mais est un lubrifiant pauvre. Elle n'est donc pas efficace pour réduire le frottement à l'interface outil-copeau-pièce. En outre, elle a un effet corrosif sur les métaux ferreux. Elle a tendance à enlever l'huile lubrifiante utilisée pour les mouvements des éléments de la machine-outil donc elle réduira la facilité de mouvement et

augmentera l'usure des éléments [34]. L'huile minérale peut inhiber la corrosion et permettre une bonne lubrification des interfaces outil-copeau-pièce. Elle est également satisfaisante pour les éléments mobiles de la machine-outil et pour sa protection contre la corrosion. Mais la conductivité thermique et la chaleur spécifique de l'huile minérale sont inférieures à celles de l'eau [34].

En général, trouver un fluide possédant les trois propriétés nécessaires est difficile. C'est pourquoi, afin d'améliorer les performances des fluides de coupe, certains additifs sont intégrés dans le fluide de coupe. E. Brinksmeier & D. A. Lucca & A. Walter (2004) [50] ont classifié les additifs de type anticorrosion, agents émulsionnants (actives polaires, esters synthétiques, les acides gras), extrême-pression "EP" (transporteurs de soufre), anti-usure (composés de phosphore), antibrouillard, antioxydants. Le tableau 1.2 présente un résumé des résultats de différentes études concernant les additifs et leurs fonctions [36, 55, 56]. Les auteurs [34, 35, 43, 47, 51] ont classifié les fluides de coupe dans quatre catégories qui sont présentés dans le tableau 1.3.

L'huile de coupe peut être composée d'huiles minérale (à base d'hydrocarbures), animale, végétale, marine ou synthétique et d'additifs. Elle est utilisée lors d'usinage à très basses vitesses. L'huile soluble, avec une bonne lubrification et un refroidissement moyen, est utilisée dans des conditions générales (tournage, fraisage). Les fluides semi-synthétiques, réalisés par substitution des éléments ou changement des pourcentages des éléments, peuvent être utilisés dans toutes les conditions de coupe. Les fluides synthétiques ne contiennent pas d'huiles de pétrole. Ils sont fabriqués avec des agents ayant des propriétés détergentes et divers additifs favorisant un bon mouillage de la pièce usinée. Le domaine d'utilisation de ce genre de fluide est le plus vaste par rapport aux autres fluides.

Tableau 1.2 : Additifs et leurs fonctions [56]

Additifs	Fonction	Composés chimiques
Agents émulsionnants	Ils offrent de la stabilité à l'émulsion.	Cationiques, Anioniques (sulfonates) Non ioniques (triéthanolamine, polyglycoether, Allylphenol, oxyéthyl)
Inhibiteurs de corrosion	Ils protègent la pièce et l'outil de la Corrosion.	Nitrites, Amines, Borates
Biocides	Ils empêchent le développement de micro-organismes dans le fluide.	Aldéhydes formiques, Phénols, Triazines, Isothiazolinones
Extrême pression (EP)	Ils forment une couche intermédiaire entre deux surfaces métalliques, ils améliorent la lubrification et évitent l'usure.	Paraffines chlorées, Composés soufrés, Composés phosphorés, Huiles minérales et graisses Alcools
Humectant ou stabilisants	Ils stabilisent le concentré.	Alcools, Phosphates, Polyglycols
Anti-mousses	Ils évitent la formation de mousses.	Silicones, Esters gras, Hydrocarbures à poids moléculaire élevé
Complexants	Ils éliminent et préviennent la formation d'incruste.	Composés organiques divers (EDTA)
Divers (détergents, dispersants, etc.)		Composés divers

Tableau 1.3 : Différents types de fluide de coupe

Fluide de base du concentré	Fluide de coupe	% Volumique les éléments			Avantages	Désavantages
		Eau	Huile	Additifs		
Non aqueux	Huile de coupe	----	80-96	4-20	Lubrification excellente, Contrôle de rouille excellent, Longue durée de vie, Facile à gérer	Remplacement cher, Excès de chaleur, Brouillard et fumée d'huile élevé, Danger de feu et de glissement,
Aqueux	Huile soluble	< 10	30-80	< 30	Lubrification physique excellente, Réduction de chaleur moyenne, Facile à gérer,	Résidus d'huile, Affectés par l'eau dure, Brouillard et fumée
	Solution synthétique	40-60	----	40-60	Très propre, Réduction de chaleur excellente, Pas affecté par l'eau dure, Peu moussant, Sans risque de feu	Lubrification physique pauvre, Pas de film de la protection par l'huile
	Émulsion semi-synthétique	30-50	5-40	20-60	Lubrification physique, Bonne réduction de chaleur, Propre, Bon contrôle de rouille	Pouvoir moussant, Affecté par l'eau dure

Les tableaux 1.4 et 1.5 présentent les domaines d'application de chaque genre de fluide de coupe.

Tableau 1.4 : Sévérité d'usinage [43]

Operation severity	Machining
Very heavy duty	Broaching, Form tapping, Reaming, Threading, Gear cutting
Heavy duty	Drilling, Sawing, Cut tapping
Moderate duty	Turning
Light duty	Milling

Tableau 1.5 : Application des fluides de coupe [43]

Severity of operation	Synthetic	Semi-synthetic	Soluble oil
Light	Rust inhibitors & cleaning agents only, no lubricants.	Low oil content (5-10%) + rust inhibitor	-----
moderate	Some polymeric lubricants	High oil content (20-30%)	High oil +/- esters & fats
Heavy	High-level polymeric lubricants + phosphate ester	High oil + EP lubricants	High oil + EP lubricants

La connaissance des fonctions et des différents types de fluide de coupe n'est pas suffisante pour traiter leurs influences sur la performance de l'usinage. La principale raison est que le nombre de variables participant à la détermination de la performance de l'usinage est important. Les caractéristiques et les méthodes d'application des fluides de coupe peuvent influencer ces variables par différentes manières.

C'est pourquoi, pour déterminer les influences des fluides de coupe sur le processus d'usinage, il nous faut connaître les différents sujets suivants :

- 1- caractéristiques du fluide de coupe;
- 2- méthode d'application;
- 3- processus d'usinage et ses conditions;
- 4- matériau usiné;
- 5- outil de coupe.

### 1.2.1.1 Caractéristiques du fluide de coupe

Selon les études effectuées, pour avoir une bonne efficacité d'arrosage pendant l'usinage, il faut considérer le type de fluide de coupe utilisé (gaz, vapeur de l'eau, huile de coupe, huile soluble, fluide synthétique et fluide semi-synthétique), ses additifs et leurs pourcentages, le ratio de dilution, la taille et la forme des éléments constitutifs du fluide et beaucoup d'autres paramètres. Il est démontré par les résultats des différentes études que le meilleur moyen de déterminer les caractéristiques du fluide de coupe approprié pour un processus d'usinage est de faire des essais.

En 2002, L. De Chiffre & W. Belluco [57] ont indiqué que trois types différents de fluide de coupe ont des influences différentes sur la durée de vie de l'outil de coupe. La figure 1.7 montre que la différence entre les influences des différents fluides, dans leur étude, diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Nous pouvons expliquer ceci par deux raisons : (1) en augmentant la vitesse de coupe, la pénétration des fluides dans la zone de coupe et par conséquent le rôle de la lubrification du fluide de coupe est de plus en plus faible. Donc, les influences des pouvoirs lubrifiants des fluides de coupe sont moins importantes sur la durée de vie de l'outil; (2) l'augmentation de la vitesse de coupe augmente le taux de génération de chaleur produite. Ceci augmente la température des fluides de coupe et par conséquent leurs pouvoirs de refroidissement convergent vers une valeur commune. Donc, leurs influences sur la durée de vie de l'outil diminuent. La figure 1.8 illustre les résultats d'une autre recherche [58] qui montre l'effet des différents types de fluide sur l'usure de la face de dépouille de l'outil (les résultats sont fonctions des conditions expérimentales). D. P. Upton (2000) [59] a essayé de trouver la dilution optimale d'une huile soluble pour le perçage d'un alliage d'aluminium (2L 99). Il a testé plusieurs dilutions volumiques 3 %, 5 %, 7.5 % et 10 % et ses résultats confirment qu'une augmentation de la dilution diminue le couple moyen et la rugosité de la surface usinée. Par contre, l'augmentation de l'avance par tour les augmente. D'après ces résultats, nous constatons qu'il n'y a pas d'effet d'interaction entre la dilution et l'avance par tour. Il est clair que la fonction de refroidissement de l'huile soluble dans cette expérience est plus influente que son pouvoir lubrifiant. Beaucoup de recherches sont menées pour découvrir les effets des additifs des fluides de coupe sur la performance de coupe. Mais à cause du nombre énormément grand d'additifs et de la variété de leurs propriétés, il nous manque beaucoup de données dans ce domaine.

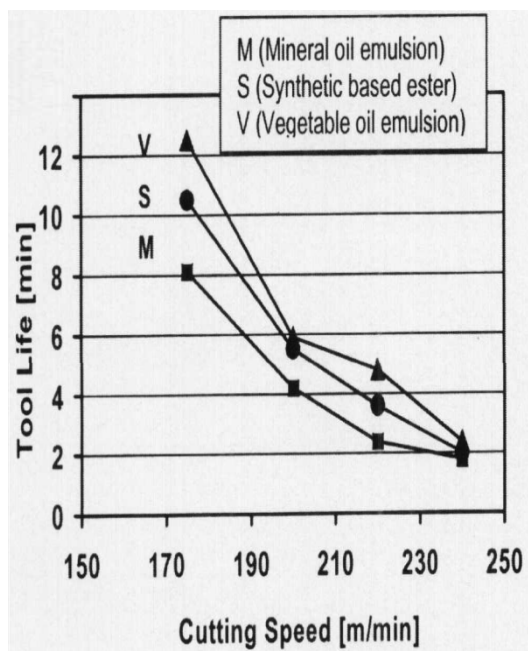


Figure 1.7 : Durée de vie de l'outil avant rupture catastrophique [57].

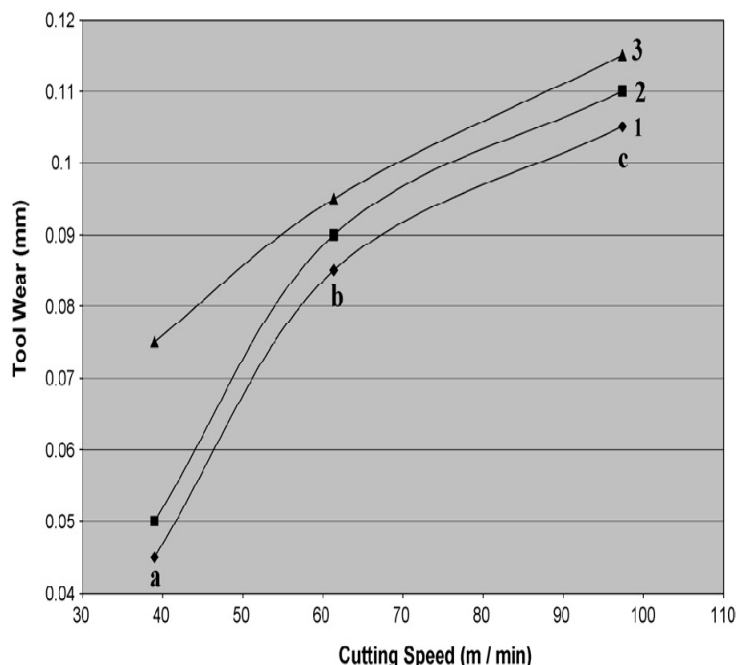


Figure 1.8 : Usure de la face de dépouille, (1) huile de coco, (2) huile soluble, (3) huile de coupe. Avance par tour (mm/tour) (a) 0.2, (b) 0.25, (c) 0.28 [58].

L'air comprimé peut être utilisé comme fluide de coupe. L'utilisation d'un jet haute pression d'air lors du tournage d'un CMAIP-SiC (AA2024) avec un outil de carbure de tungstène revêtu du TiCN (PVD) est examinée par X. P. Li & K. H. W. Seah (2003) [60]. Ils ont considéré trois variables indépendantes (direction du soufflage de l'air, compression de l'air et pourcentage massique des particules de renforcement (SiC) dans la matrice) et une variable dépendante (usure sur la face de dépouille de l'outil). Les résultats établissent que la meilleure direction (usure minimum) pour le jet d'air est la direction parallèle à la face de coupe. Cette direction permet à l'air comprimé de pénétrer dans la zone de coupe. Selon les auteurs, l'air comprimé a deux fonctions. Premièrement, elle enlève les particules de la zone de coupe (diminution du nombre de particules SiC dans la zone de coupe). Deuxièmement, elle crée une force sur les particules de SiC qui sont en contact de l'arête de coupe. L'arête de coupe doit couper les particules mais la force nécessaire pour surmonter la résistance au cisaillement des particules de SiC est plus grande que la force interfaciale entre les particules et le matériau de la matrice. Au lieu d'être coupées, les particules de SiC ont tendance à se détacher du matériau de la matrice. La force appliquée par l'air comprimé sur les particules peut les aider à rester à leurs places et à se couper (deuxième phénomène diminuant le nombre des particules SiC dans la zone de coupe). La diminution du

nombre de particules diminue le coefficient de frottement présent dans la zone de coupe et par conséquent réduit l'usure de l'outil.

La vapeur d'eau est un nouveau type de fluide de coupe utilisé pendant l'usinage. La majorité des recherches effectuées concernant ce sujet confirment que la compression et le débit de la vapeur d'eau sont fortement importants pour l'efficacité de l'arrosage au cours de l'usinage. L'utilisation d'un jet de vapeur d'eau est généralement limitée à l'usinage des matériaux non ferreux (pour éviter la corrosion). R. Shetty & R. Pai & V. Kamath (2008) [40] ont essayé de comparer les effets de quatre types du fluide de coupe, ils ont fait leur essais dans les conditions suivantes :

Processus (tournage), matériau (CMAIP-SiC), 15 % volumique de renforcement, matrice à base aluminium 6061, types de fluide de coupe (vapeur d'eau, huile soluble, air comprimé, sec, la pression des fluides de coupe est de 7 bars), variable indépendante (profondeur de coupe : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm), variables dépendantes (efforts de coupe, température de coupe, rugosité de la surface, coefficient de frottement), avance par tour (0.2 mm), vitesse de coupe (150 m/min), outil (TPGN 160304-LS, outil CBN).

Selon les résultats : l'usinage sous l'arrosage par vapeur d'eau est plus efficace que l'usinage sous l'arrosage par d'autres types de fluide ou l'usinage à sec. Elle améliore la rugosité de la surface et diminue l'effort de coupe jusqu'à 35 % et la température de coupe jusqu'à 40 % par rapport à l'usinage à sec. L'air comprimé et l'huile soluble sont respectivement second et troisième.

Les résultats sont intéressants, mais les auteurs n'ont pas expliqué suffisamment les résultats obtenus. À mon avis, leurs résultats montrent que : (1) la vapeur de l'eau a un fort pouvoir lubrifiant (plus fort que l'huile soluble); (2) le taux de pénétration du fluide dans la zone de coupe ne dépend pas seulement de la pression et de la vitesse du fluide, il dépend aussi de la structure et de la taille des éléments du fluide; (3) le pouvoir de refroidissement d'un fluide n'est pas seulement dépendant de sa conductivité thermique et de sa chaleur spécifique, il est dépendant de la forme et de la taille des éléments constitutifs du fluide.

### 1.2.1.2 Méthode d'application

La méthode d'application du fluide de coupe a une forte influence sur la pénétration du fluide dans la zone de coupe et aussi sur son efficacité. Les méthodes peuvent être classifiées dans deux groupes principaux, (1) sous pression; (2) sans pression [61].

Les différentes méthodes d'application du fluide de coupe, leurs avantages et leurs inconvénients sont présentés ci-dessous [36, 51, 61] :

1. **Brossage** : les fluides de coupe peuvent être appliqués manuellement et sans pression. Dans les petits ateliers d'usinage, l'opérateur applique avec une brosse le fluide de coupe. Cette méthode est la plus simple et la moins onéreuse pour appliquer le fluide (débit l/h). Les inconvénients connus sont : (1) l'application du fluide est intermittente; (2) l'évacuation des copeaux est très faible; (3) la pénétration du fluide dans la zone de coupe est limitée.
2. **Arrosage copieux** : la méthode commune d'application du fluide de coupe est l'arrosage copieux (débit environ : 200-1800 l/h). Dans cette méthode d'application, le nombre de buses, leurs positions et leurs directions sont vraiment importants pour augmenter l'efficacité de l'arrosage. Les avantages de cette méthode sont : (1) l'application facile; (2) le refroidissement parfait pour la pièce usinée, qui est particulièrement important pendant usinage de paroi mince; (3) l'évacuation des copeaux est excellente. Les inconvénients les plus importants sont : (1) l'utilisation de quantités très importantes de fluide; (2) seulement une petite partie du fluide de coupe parvient à atteindre la zone de coupe, la grande partie du fluide de coupe tend à refroidir uniquement la région voisine de la zone de coupe. Cela intensifie ainsi les gradients de température et augmente les tensions thermiques; (3) généralement le fluide ne peut pas arriver aux interfaces de contact à haute vitesse de coupe, ce qui diminue fortement l'efficacité de l'application du fluide de coupe; (4) l'application de l'écoulement du fluide produit des particules suspendues dans l'air. Ce brouillard peut poser un risque important pour la santé/sécurité des ouvriers, la figure 1.9 montre le brouillard, mais les plus petites particules qui peuvent être inhalées sont trop petites pour être visualisées dans la figure 1.9; (5) en augmentant la température de la zone de coupe, les fluides qui sont en contact avec les



surfaces très chaudes s'évaporent et forment une couche sur ces surfaces. Ces couches augmentent la résistance thermique et diminuent le taux de transfert de chaleur.



Figure 1.9 : Brouillard produit en arrosage copieux [47].

3. Jet ou jet à haute pression : le fluide de coupe peut être appliqué directement dans la zone de coupe avec une grande pression ou une grande vitesse. La grande vitesse ou la grande pression du fluide de coupe augmente fortement le taux de pénétration du fluide de coupe dans la zone de coupe. Le fluide sous pression ou à grande vitesse enlève facilement les couches de vapeur créées sur les surfaces très chaudes, augmentant ainsi le taux de transfert de chaleur. La pression et la vitesse du fluide de coupe ainsi que le nombre de buses, de jets utilisés, leurs positions et leurs directions sont les principaux facteurs influençant l'efficacité du fluide de coupe. La figure 1.10 montre un système d'application de jet du fluide de coupe (débit environ : 60-240 l/h).

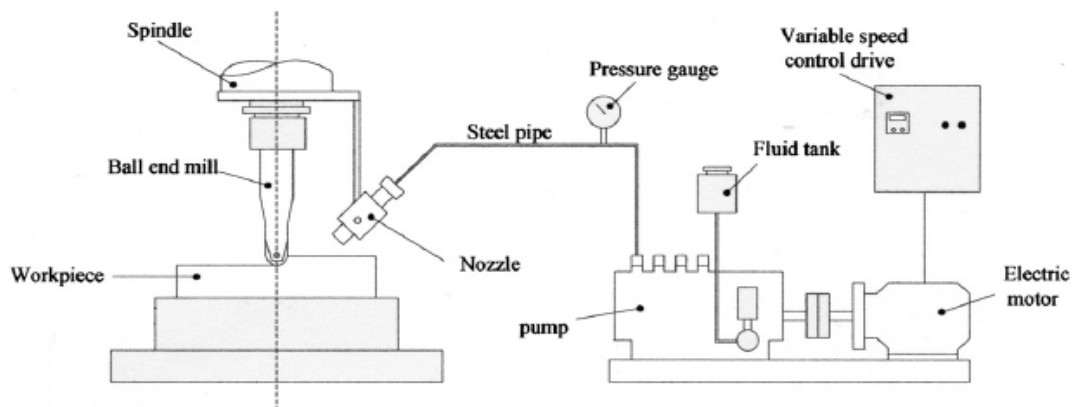


Figure 1.10 : Système d'application du jet du fluide de coupe [62].

Avantages : (1) la pénétration du fluide de coupe à la zone de coupe est maximale; (2) l'application à grande vitesse de coupe est possible; (3) l'évacuation des copeaux est parfaite. Inconvénients : (1) la quantité de fluide de coupe utilisé est élevée; (2) le brouillard produit est important.

4. Brouillard : les fluides de coupe peuvent être atomisés et soufflés sur l'interface outil-copeau-pièce. Les gouttes de fluide suspendues dans l'air peuvent être produites par la condensation d'un fluide vaporisé. La pression et la direction du flux brouillard sont essentielles à la réussite de l'application (débit : ml/h). Avantages : (1) la quantité de fluide utilisé est très faible; (2) l'application pendant l'usinage à grande vitesse est efficace; (3) le brouillard peut atteindre parfaitement l'interface outil-copeau-pièce. Inconvénients : (1) l'augmentation de risques pour la santé de l'ouvrier par l'inhalation des gouttes de fluide. Une ventilation performante est nécessaire pour protéger l'opérateur; (2) l'augmentation de la tension thermique dans la pièce et dans l'outil; (3) l'évacuation des copeaux n'est pas idéale.
5. Jet spray : les petites gouttes du fluide de coupe peuvent être transportées et pénétrées dans la zone de coupe par un écoulement d'air à grande vitesse (débit : ml/min). [63-65]. Dans cette méthode, les gouttes de fluide lubrifient les interfaces de contact, l'air à grande vitesse refroidit la zone de coupe et évacue les copeaux. La figure 1.11 montre un schéma du système de jet spray.

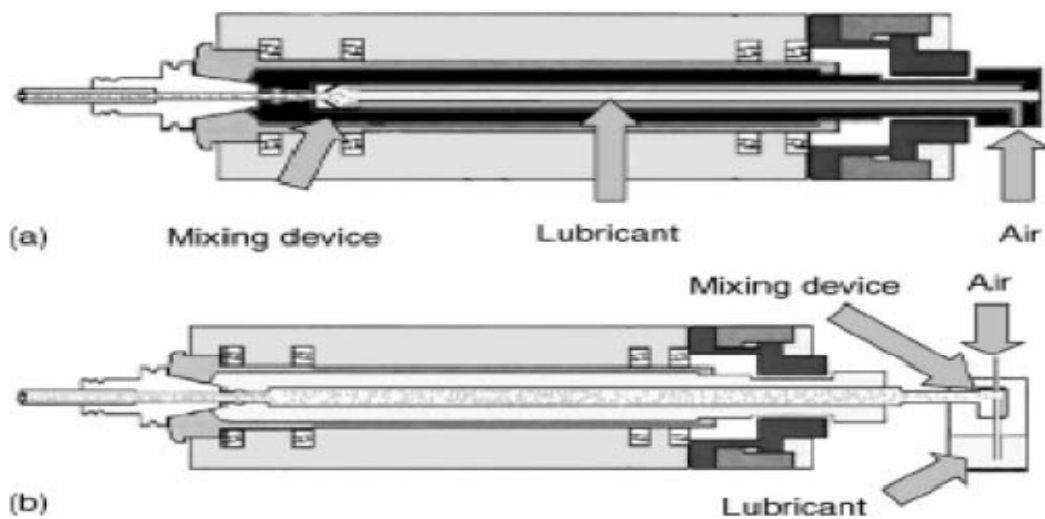


Figure 1.11 : Schéma du système de jet spray [66].

Le nombre et la taille des particules de fluide qui arrivent aux interfaces outil-copeau-pièce dépendent de la vitesse d'écoulement de l'air, de la pression du fluide de coupe, de la taille des buses, de la distance entre la buse et les surfaces et de la position de la buse par rapport à la zone de coupe [63-65].

6. Par l'outil : le fluide de coupe peut pénétrer dans la zone de coupe par passage à l'intérieur de l'outil (débit de : ml/h à l/h). Cet écoulement peut être réalisé sous pression ou sans pression et le fluide peut être sous plusieurs formes : liquide, brouillard ou aérosol (spray). Cette méthode est souvent utilisée pour le perçage profond (cf. figure 1.12). Avantages : (1) le débit de fluide est faible; (2) le meilleur moyen d'apporter le fluide dans la zone de coupe; (3) l'évacuation des copeaux est parfaite. Inconvénients : (1) les caractéristiques mécaniques de l'outil de coupe changent; (2) la méthode est très sensible aux particules suspendues dans le fluide de coupe; (3) la rugosité de la surface usinée augmente parfois.

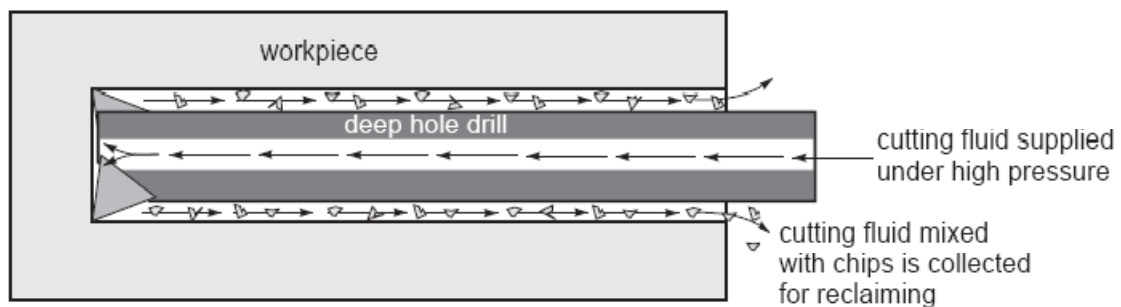


Figure 1.12 : Application du fluide de coupe par l'outil [67].

P. S. Sreejith (2008) [7] a comparé l'influence des différentes méthodes d'application du fluide de coupe. Le processus d'usinage était le tournage, le matériau usiné était l'aluminium 6061 et l'outil utilisé était un outil en carbure revêtu par diamant. L'usinage est réalisé dans un environnement sec, lubrification minimale (LM) et arrosage copieux. Les résultats montrent que :

- (1) l'augmentation de la vitesse de coupe dans tous les environnements étudiés diminue la durée de vie de l'outil;
- (2) l'usinage sous l'arrosage copieux produit toujours une usure d'adhérence minimale, suivie par l'usinage sous LM et l'usinage à sec, qui produit toujours l'usure d'adhérence maximale;
- (3) l'usinage sous LM produit toujours la durée de vie de l'outil maximale, suivie par l'usinage sous l'arrosage copieux et l'usinage à sec, qui produit toujours la plus courte durée de vie d'outil;
- (4) l'usinage à sec produit toujours la rugosité de surface

minimale, suivie par l'usinage sous LM et l'usinage sous l'arrosage copieux, qui produit toujours la rugosité de surface maximale. En résumé, l'augmentation de la quantité de fluide de coupe appliquée pour l'arrosage n'améliore pas toujours les critères de la performance de coupe. La figure 1.13 présente ces résultats.

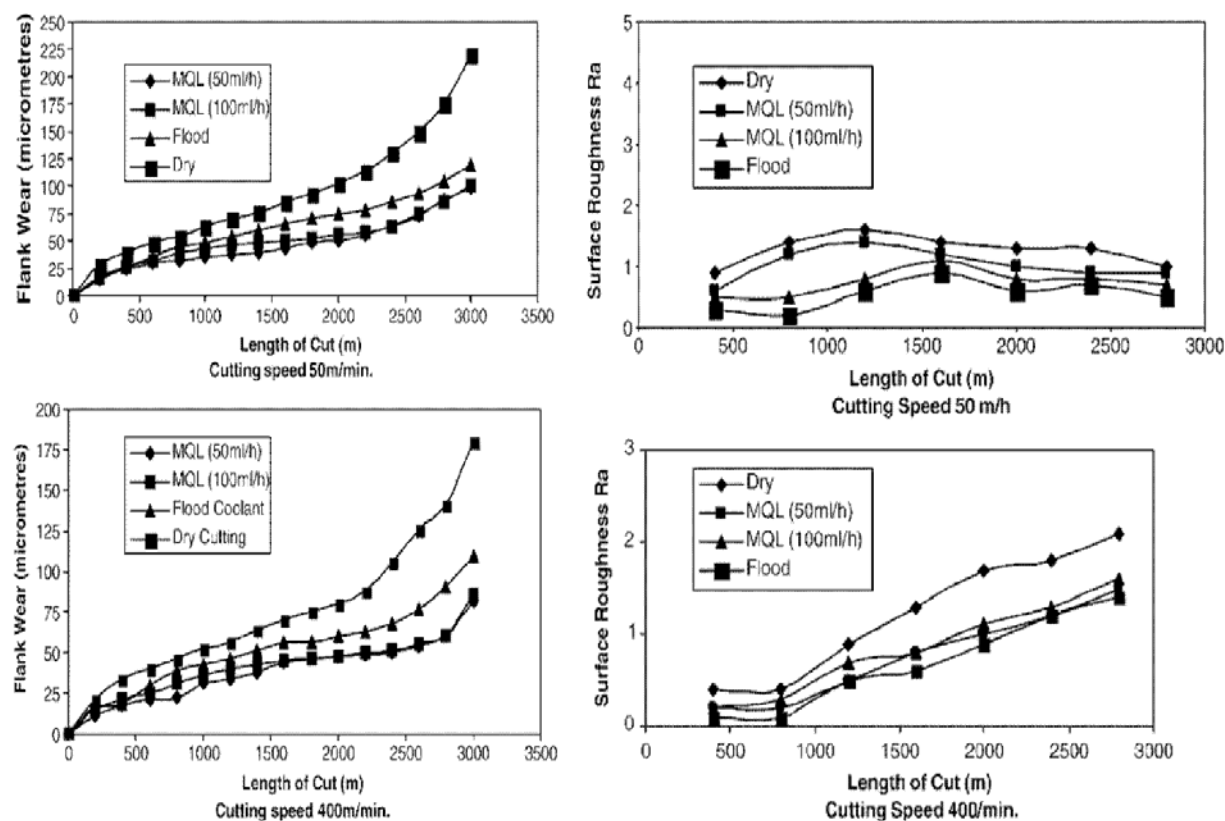


Figure 1.13 : Influence des différents modes arrosage sur l'usure d'outil et la rugosité de la surface usinée [7].

L'utilisation d'une méthode d'application de fluide de coupe non appropriée pour un processus d'usinage et pour des conditions déterminées peut influencer négativement la performance de coupe. Par exemple, en fraisage, la température augmente et diminue à cause de l'interruption du processus. La dilatation et la contraction provoquées par ces fluctuations de température entraînent une fatigue de l'arête de coupe. L'arrosage copieux dans cette condition peut augmenter les chocs thermiques et diminuer la durée de vie de l'outil. Dans cette condition, mettre en œuvre une lubrification minimale est souvent efficace et permet un prolongement de la durée de vie de l'outil.

### 1.2.1.3 Processus d'usinage et ses conditions

La détermination du fluide de coupe et de la méthode d'application ne peut pas assurer que l'influence du fluide de coupe sur les critères de la performance de coupe soit constante. En effet, si le type de processus change (tournage, fraisage, perçage, etc.) ou les conditions de coupe changent (vitesse de coupe, avancement d'outil, profondeur de coupe, etc.), l'efficacité du fluide de coupe évolue.

Chaque processus a ses propres caractéristiques, la méthode d'application du fluide et le type de fluide de coupe n'affectent pas de la même manière deux processus différents. Pour un même processus, le changement des paramètres de coupe changera la quantité de chaleur produite. Il en est de même pour le taux de la pénétration du fluide dans la zone de coupe. Nous aurons donc un changement d'influence du fluide de coupe sur la performance de coupe.

La figure 1.14 présente une partie des résultats de l'étude de L. De Chiffre & W. Belluco (2002) [57] (présentée à la page 21). Cette figure montre que l'influence du fluide sur l'usure de l'outil change lorsque les paramètres de coupe évoluent.

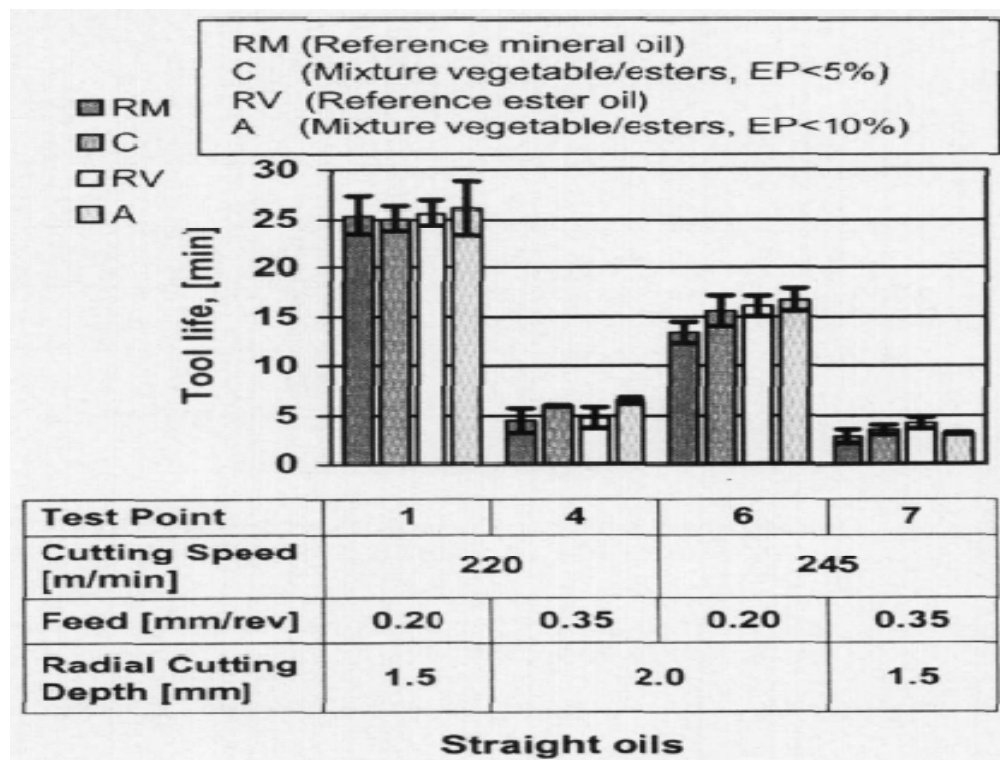


Figure 1.14 : Durée de vie de l'outil en fonction de  $VB_{Bmax}$  [57].  
 $VB_{Bmax} = 0.3$  mm, Processus : tournage; matériau : acier inoxydable austénitique

#### **1.2.1.4 Matériau usiné**

Un autre facteur important qui modifie les effets du fluide de coupe lors d'un processus d'usinage est le matériau usiné.

La composition du matériau a un rôle principal dans la détermination de la quantité de chaleur produite et de la dispersion de chaleur. L'usinage des alliages à base de chrome et de nickel produit généralement une grande quantité de chaleur [68, 69], ce qui nécessite absolument la présence de fluide de coupe. Le titane est lui aussi difficile à usiner à cause de sa composition [68, 69]. Il a tendance à coller sur l'outil pendant l'usinage, le coefficient de sa conductivité thermique est très faible et, dans le cas de certains alliages, présente un point d'éclair très bas. En conséquence, les copeaux n'évacuent pas la chaleur et la pièce peut s'échauffer suffisamment pour prendre feu. Donc, l'arrosage est nécessaire pour l'usinage de titane et ses alliages. Par contre, pour la majorité des alliages d'aluminium, jusqu'à une vitesse intermédiaire, l'arrosage n'est pas nécessaire. Ils ont une basse résistance au cisaillement (faible production de chaleur) et une haute conductivité thermique, qui permet à la chaleur de se dissiper en majorité dans le copeau [68, 69]. Pour l'usinage des alliages d'aluminium à grandes vitesses, l'utilisation d'arrosage sous haute pression peut faciliter l'évacuation des copeaux et refroidir la zone de coupe (un simple jet d'air comprimé peut être suffisant dans certains cas). Parfois l'arrosage est prohibé à cause de la nature du matériau, par exemple : (1) quand le fluide peut contaminer le matériau usiné (matériau fritté); (2) quand il peut en augmenter la corrosion; (3) les alliages réfractaires, les céramiques, etc.

#### **1.2.1.5 Outil de coupe**

Le matériau de l'outil de coupe, sa géométrie et son revêtement affectent significativement l'efficacité des fluides de coupe.

L'arrosage ne diminue pas toujours l'usure de l'outil. Parfois, utiliser un fluide de coupe provoque des problèmes pour les outils avec revêtement comme : (1) les carbures revêtus, (2) les céramiques, (3) les cermets, (4) le nitrure de bore cubique, (5) le diamant polycristallin. Ils sont tous, dans leur majorité, des matériaux de coupe fragiles. Donc, ils sont sensibles aux chocs thermiques. Ce problème est important quand nous les utilisons pour des opérations de dressage ou de fraisage. Dans ces conditions, l'arrosage peut avoir une influence négative.

D. Jayal & A. K. Balaji (2009) [70] ont utilisé deux outils (plaquettes) qui ont une faible différence géométrique et les résultats qu'ils ont trouvés confirment l'effet de la géométrie de l'outil sur l'efficacité du fluide de coupe. La figure 1.15 illustre les géométries des deux plaquettes. La figure 1.16 montre l'effet de deux plaquettes sur la durée de vie de l'outil. La figure 1.17 montre leur effet sur l'usure de la face de dépouille (processus : tournage).

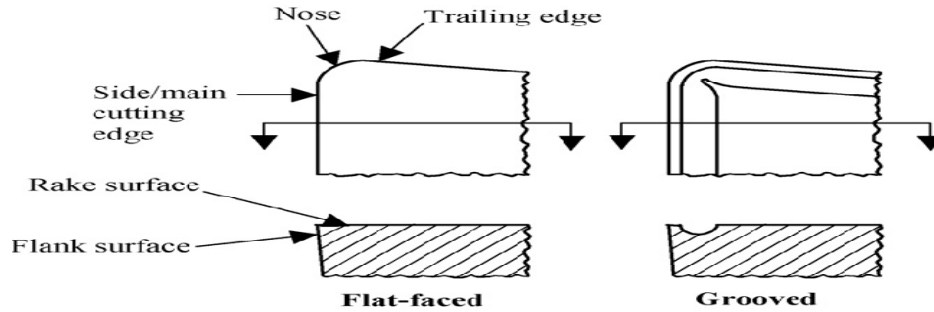


Figure 1.15 : Géométries des deux plaquettes utilisées [70].

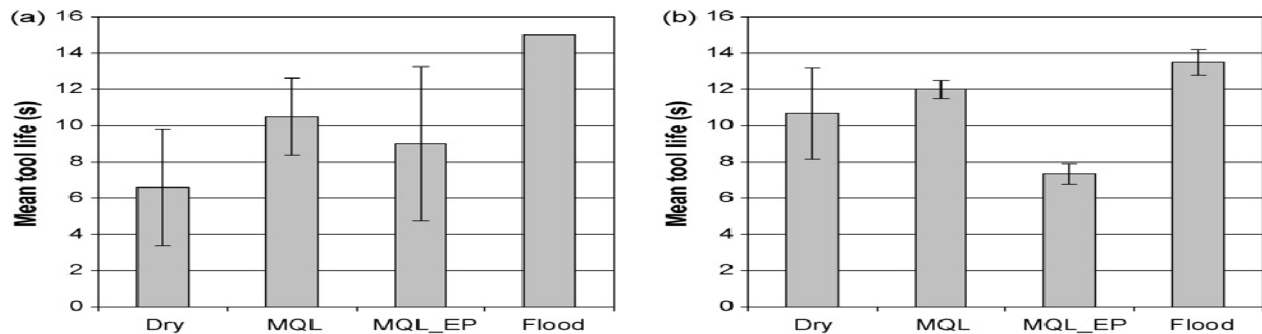


Figure 1.16 : Effet de la géométrie de plaquette sur la durée de vie de l'outil, (a) face plane, (b) face courbée [70].

MQL (LM, huile minérale soluble, 30 ml/h), MQL\_EP (LM, même huile avec additif EP, 30 ml/h), flood (arrosage copieux, même huile, 9 l/min).

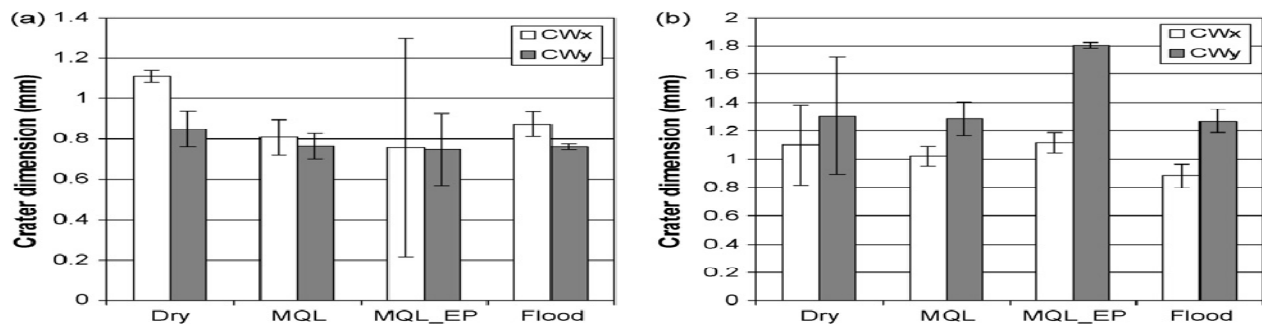


Figure 1.17 : Effet de la géométrie de la plaquette sur l'usure de face de coupe, (a) face plane, (b) face courbée [70].

CWx (largeur de l'usure perpendiculaire de l'arête de coupe), CWy (largeur de l'usure parallèle de l'arête de coupe).

Après avoir fait une étude approfondie sur le sujet d'arrosage, nous pouvons émettre que : si nous choisissons un fluide de coupe convenable (en considérant le matériau usiné, l'outil, le processus et les conditions de coupe) et que nous assurons sa pénétration dans la zone de coupe par un moyen acceptable (méthode d'application), les résultats peuvent être satisfaisants par rapport à l'environnement sec car nous constatons : (1) une augmentation de la durée de vie de l'outil; (2) une meilleure évacuation des copeaux; (3) une amélioration de la rugosité de la surface usinée; (4) une diminution de la contrainte résiduelle, de l'endommagement subsurfacique et de la dureté; (5) une diminution des efforts de coupe; (6) une augmentation de la précision dimensionnelle de la pièce usinée; (7) une réduction de l'effet thermique sur la machine-outil.

Les inconvénients connus pour l'arrosage sont :

(1) Le fluide de coupe représente environ 7 à 17 % des coûts totaux d'usinage. Selon F. Klocke & G. Eisenblaetter (1997) [71], le coût d'utilisation du fluide de coupe est environ de 7 à 17 % du coût total d'une pièce. Ce coût est parfois plus important que le coût de l'outil de coupe. La figure 1.18 montre les résultats de recherche de Klocke dans l'industrie automobile à l'allemande.

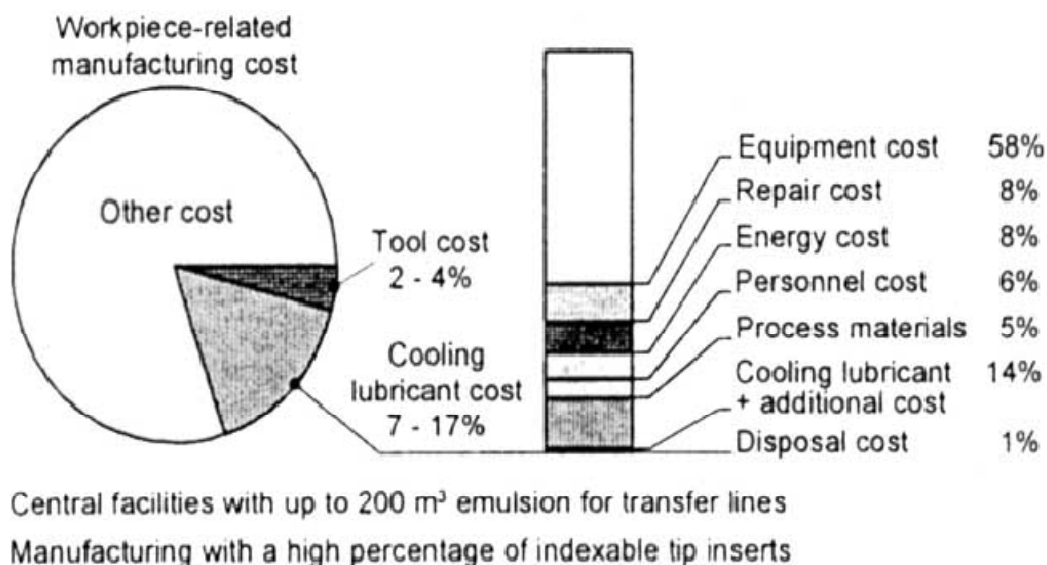


Figure 1.18 : Coûts d'usinage d'une pièce  
Source: Heidelberger Druckmaschinen, WZL [71].

(2) La contamination par fluide de coupe (aérosol, brouillard), gestion du stockage du fluide de coupe usagé et les copeaux mouillés par fluide de coupe sont dangereux pour l'environnement et pour la santé de l'ouvrier (cancer, etc.).



La figure 1.19 montre les aspects environnementaux du processus d'usinage [56].

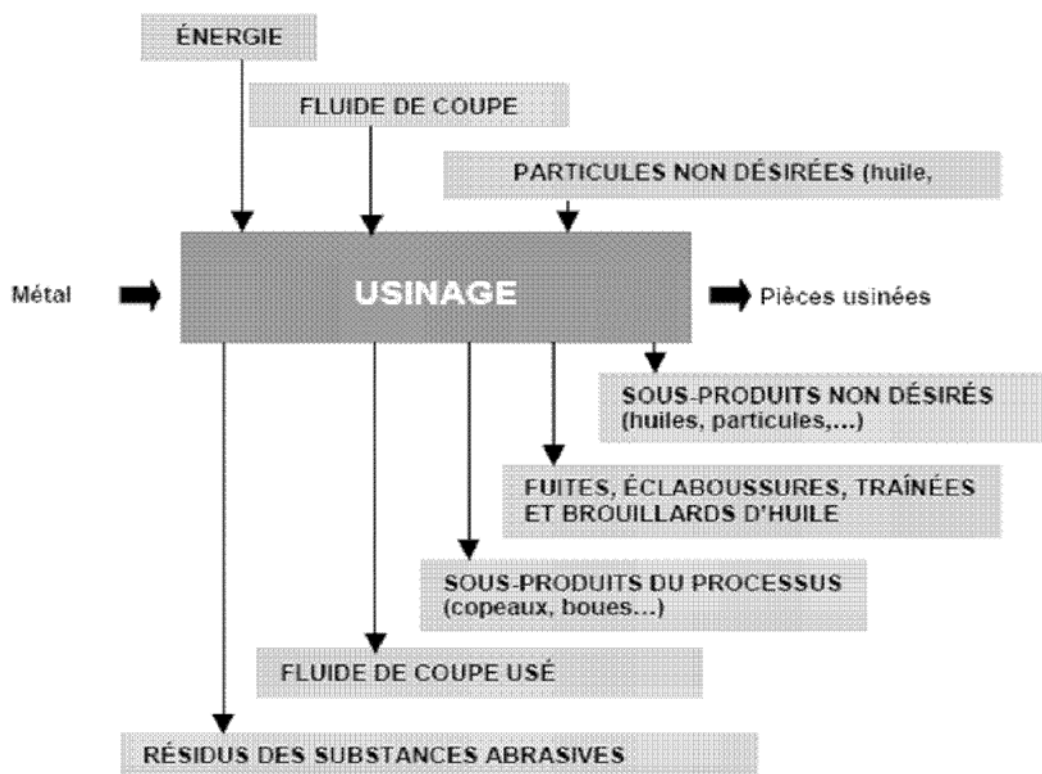


Figure 1.19 : Aspects environnementaux au processus d'usinage

Source : Schéma réalisé à partir du Libro Blanco para la Minimización de residuos y emisiones. Mecanizado del Metal, IHOBE, S. A. [56].

### 1.2.2 Lubrification par film solide

La lubrification par film solide est un nouveau concept pour contrôler la température dans la zone de coupe sans polluer l'environnement [72]. Le graphite et le disulfure de molybdène (MoS<sub>2</sub>) sont les matériaux lubrifiants les plus connus. Les autres matériaux utilisés sont : le nitrure de bore, le polytétrafluoroéthylène (PTFE), le talc, le fluorure de calcium, le fluorure de cérium, le sulfure de tungstène [73]. Le lubrifiant solide est utilisé sous la forme de poudre sèche ou soluble dans un liquide. Ces lubrifiants sont très efficaces en raison de leur structure laminaire. Les lamelles sont orientées parallèlement à la surface, dans la direction du mouvement. De cette façon, les lamelles sont facilement déplaçables dans le sens de la couche horizontale et peuvent supporter verticalement de très grandes charges. Les lubrifiants solides avec grosses particules sont plus efficaces sur les surfaces relativement rugueuses et pour les faibles vitesses. Les

particules plus fines sont plus efficaces sur les surfaces relativement lisses et pour les vitesses plus élevées.

Les expériences de D. Mukhopadhyay & S. Banerjee (2007) [72] ont été effectuées pour étudier l'effet de la lubrification des particules solides sur la rugosité de la surface usinée et sur le rapport de coupe. Le rapport de coupe ( $t_c/t$ ) est un paramètre qui est utilisé pour comprendre le processus de coupe, où  $t_c$  est l'épaisseur de copeau mesurée et  $t$  est l'épaisseur de copeau non coupé. Un faible rapport de coupe indique une bonne lubrification à l'interface de l'outil-copeau. Si le rapport de coupe diminue, l'efficacité du processus augmente. Ils ont observé une diminution du rapport de coupe et de la rugosité de la surface en cas d'utilisation de la lubrification par film solide.

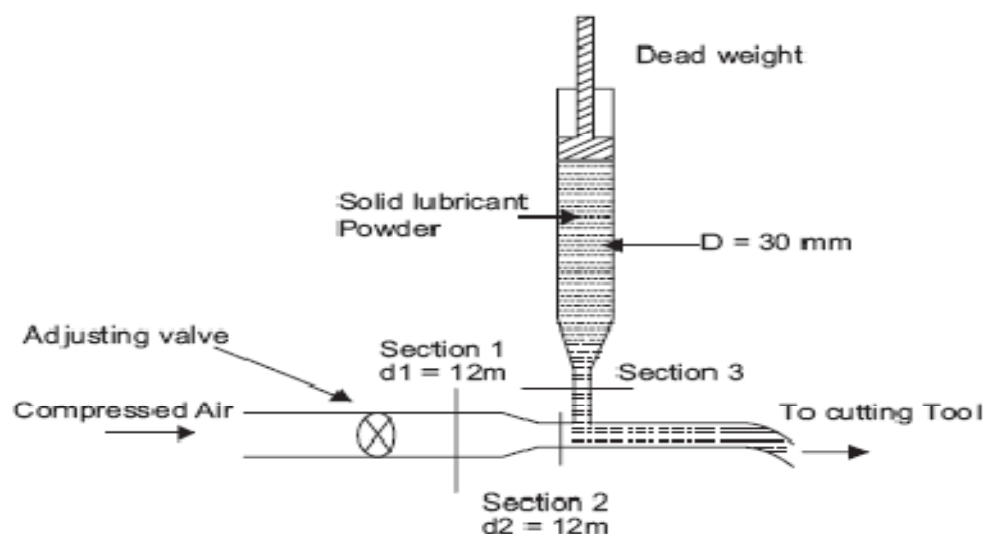


Figure 1.20 : Système de lubrification par film solide [74].

La figure 1.20 montre le système d'application du lubrifiant solide utilisé au cours des expériences effectuées par D. Rao & P. Krishna & R. Srikant (2008) [75]. Ils ont montré qu'au cours de l'usinage, en raison de la haute température produite à l'interface d'outil-copeau, le lubrifiant solide peut fondre et constituer un film mince lubrifiant sur la face de coupe de l'outil. Cela entraîne une diminution du frottement dans cette interface et par conséquent diminue l'effort de coupe. L'usure de la face de dépouille de l'outil de coupe diminue grâce au petit coefficient de frottement du lubrifiant solide. Ils ont constaté que l'efficacité de lubrification par film solide est fortement dépendante du matériau lubrifiant, de la taille des particules solides et du débit de lubrifiant. Ils ont trouvé que cette méthode de lubrification possède des avantages considérables.

par rapport à l'usinage sous arrosage ou à sec : (1) la diminution de la rugosité de la surface usinée (figure 1.21); (2) la diminution de l'usure de la face de dépouille de l'outil (figure 1.22). Les avantages de la lubrification par film solide sont [72, 76-79]: (1) l'amélioration de l'état de la surface; (2) la diminution des efforts de coupe; (3) la réduction de la contamination de l'environnement et l'augmentation de la sécurité des opérateurs.

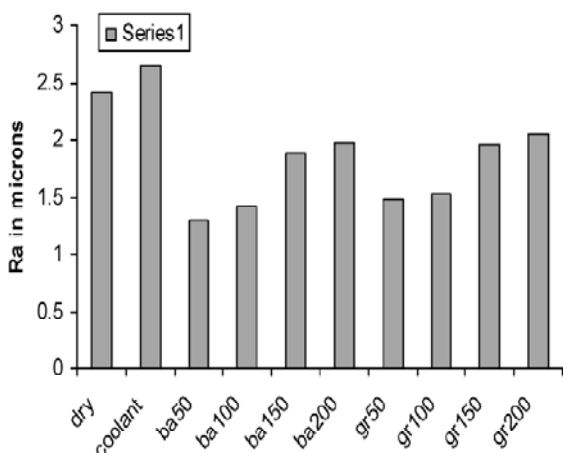


Figure 1.21 : État de la surface usinée

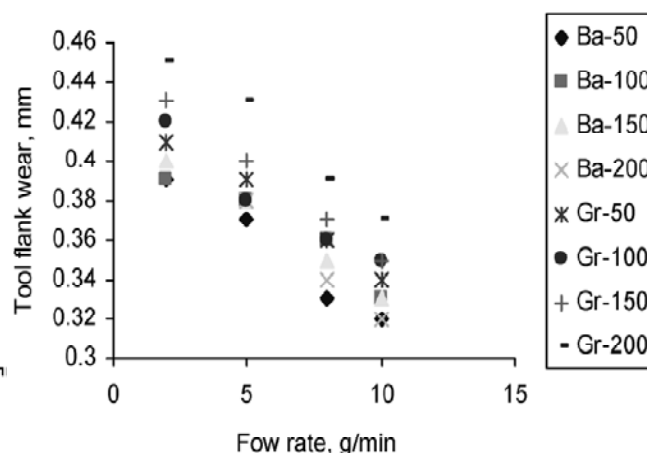


Figure 1.22 : Usure de la face de dépouille

Conditions : gr (particules graphite), dry (sec), ba (acide borique), coolant (arrosage), les tailles des particules solides présentées sont de l'ordre du  $\mu\text{m}$  (50,100,150,200) [75].

### 1.2.2.1 Méthode d'application

Le film de particules solides peut se former sur les interfaces outil-copeau-pièce par trois méthodes différentes : (1) l'injection de particules solides sous la forme soluble ou poudre dans la zone de coupe [77, 80]; (2) le matériau usiné contient des particules de lubrifiant (matériau autolubrifiant) [69]. V. Songmene & M. Balazinski (1999) [81] ont effectué une étude sur l'usinabilité du CsMAIPA-SiC (un matériau autolubrifiant) et leurs résultats confirment que l'utilisation des particules de graphite en CsMAIP-SiC peut améliorer son usinabilité; (3) l'outil de coupe peut apporter des lubrifiants solides en ayant : (a) une couche mince d'un matériau lubrifiant sur ses surfaces [82, 83]; (b) des trous sur les faces de coupe et de dépouille remplis par des lubrifiants solides [84].

### 1.2.3 Refroidissement cryogénique

L'utilisation d'un gaz liquéfié est faite pour diminuer la température de la zone de coupe, de la pièce ou de l'outil. Les gaz les plus utilisés sont le nitrogène ( $\text{N}_2$ ) avec un point d'ébullition à

-196°C et le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) avec un point d'ébullition à -44°C, le  $\text{CO}_2$  est moins cher que le  $\text{N}_2$ , mais le nitrogène est préférable à cause de son point d'ébullition et de l'effet environnemental non négatif [85]. Il y a deux méthodes d'utilisation des gaz liquéfiés : (1) avant la coupe afin de traiter cryogéniquement le matériau usiné ou l'outil; (2) pendant la coupe afin de refroidir l'outil ou le matériau usiné [86].

### 1.2.3.1 Méthode d'application pendant l'usinage

La pénétration du gaz liquéfié pendant le processus d'usinage peut être réalisée par deux moyens : direct ou indirect. L'application directe est faite suivant deux méthodes :

(1) Le refroidissement cryogénique de la zone de coupe par pénétration directe d'un gaz liquéfié dans la zone de coupe. La vaporisation du liquide au contact des surfaces chaudes absorbe fortement la chaleur produite, ensuite le gaz formé quitte la zone de coupe [66]. L'efficacité de cette méthode dépend de la pression et du débit du gaz liquéfié. Cette méthode serait plus avantageuse en augmentant la chaleur produite (augmentation de vitesse, profondeur de coupe, largeur de coupe, résistance du cisaillement du matériau, dureté du matériau, etc.) [66, 76]. La figure 1.23 présente un schéma du système utilisé par K. V. B. S. Kalyan Kumar & S. K. Choudhury [87]. Ils ont effectué une série d'essais pour déterminer l'influence du jet d'azote liquéfié (pression 5 bars) sur l'usure d'outil et sur l'effort de coupe. Le processus est le tournage d'un acier inoxydable avec plaquette de carbure (TPUN 160304). Les résultats ont été comparés à l'usinage à sec et une diminution de 14.83 % de l'effort de coupe et de 37.39 % de l'usure de la face de dépouille de l'outil a été constatée.

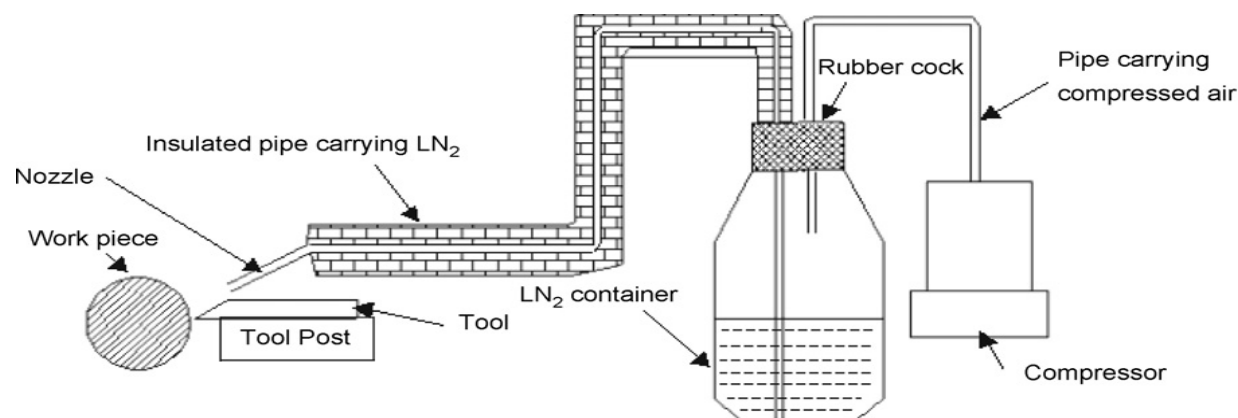


Figure 1.23 : Schéma d'un système de refroidissement cryogénique de la zone de coupe [87].

(2) Le refroidissement limité à l'outil de coupe par gaz liquéfié. Cette méthode consiste à refroidir l'élément le plus sensible à la température (partie active de l'outil de coupe). Cette méthode est applicable par plusieurs moyens : (a) immerger la queue de l'outil dans le réservoir du gaz liquéfié (ce système n'est pas pratique) [88]; (b) mettre en contact la face arrière de l'outil avec le gaz liquéfié (face parallèle à la face de coupe) (figure 1.24) [89]; (c) faire circuler le gaz liquéfié dans un réseau construit à l'intérieur de la couverture de l'outil (figure 1.25) [90-92]; (d) injecter le gaz liquéfié dans le réseau à l'intérieur du porte-outil et dégager le gaz formé à l'atmosphère [93].

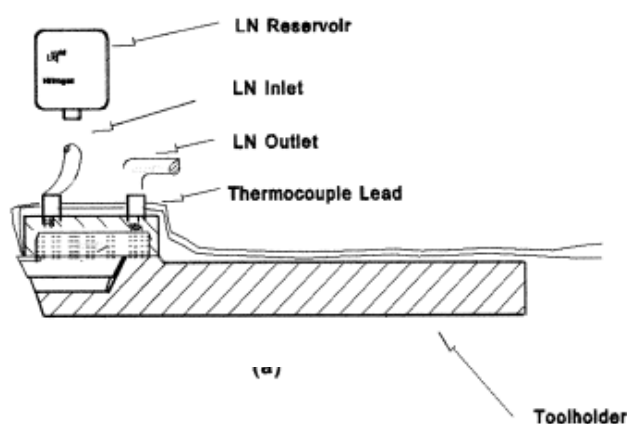
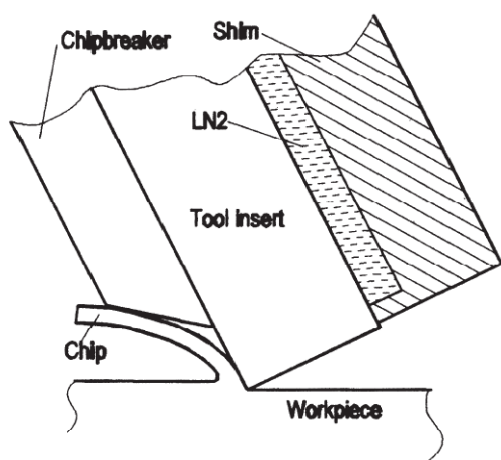


Figure 1.24 : Refroidir par l'arrière d'outil [89].      Figure 1.25 : Refroidir par circulation [90]

Les avantages du refroidissement limité à l'outil de coupe sont : (1) le gaz liquéfié ne touche pas le matériau usiné, il n'y a donc aucun changement significatif des propriétés du matériau usiné; (2) la stabilité du refroidissement de l'outil est bonne; (3) le débit du gaz liquéfié est faible par rapport à la première méthode. Les paramètres importants pour obtenir une bonne efficacité par cette méthode sont : (1) la conductivité thermique du matériau de l'outil de coupe; (2) l'interface de contact entre l'outil et le gaz liquéfié; (3) la distance entre l'interface de contact et le point de température maximale de l'outil.

### 1.2.3.2 Méthode d'application avant la coupe

Le but de l'utilisation du gaz liquéfié avant la coupe est de réaliser un traitement cryogénique. Celui-ci produit une amélioration des propriétés des matériaux grâce à un processus de refroidissement défini. Les deux traitements cryogéniques appliqués avant la coupe sont :

(1) Le traitement cryogénique de l'outil de coupe. Cela peut améliorer la résistance à l'usure du matériau de l'outil [86]. Le traitement de l'outil en carbure aide à former du carbure dans l'outil et aide à homogénéiser son matériau [66]. Toutefois, l'influence du traitement cryogénique sur les performances de coupe n'est pas constante pour tous les processus d'usinage et pour toutes les conditions de coupe [66]. Le bon choix des conditions du processus de traitement peut augmenter jusqu'à 150 % la durée de vie de l'outil.

(2) Le traitement cryogénique du matériau usiné peut être réalisé : (a) avant la coupe afin de diminuer la ductilité du matériau et modifier la formation de copeau. Cette méthode est recommandée pour les matériaux de type AISI 1008 et 1010, acier à bas carbone (augmentation du bris des copeaux); (b) pendant le processus d'usinage avant d'entrer dans la zone de coupe afin d'améliorer la propriété du matériau et de diminuer sa température. Cette méthode est recommandée pour les matériaux de type AISI 1070, E52100 et les alliages d'aluminium (diminuer la ductilité et la tendance à adhérer) [86, 94].

Les avantages du refroidissement cryogénique par rapport à l'usinage sous arrosage et à sec sont [66, 86, 94] : (1) la diminution de l'usure de l'outil; (2) l'amélioration de la rugosité de surface; (3) l'absence d'empreinte environnementale. Les inconvénients sont : (1) les coûts élevés d'achat et d'installation des équipements nécessaires; (2) l'effet non désirable sur les propriétés du matériau dans certaines méthodes application.

#### **1.2.4 Usinage à chaud**

La logique de cette solution repose sur la physique des matériaux, (1) la majorité des matériaux s'adoucissent lorsque leur température augmente; (2) l'échauffement des matériaux au-dessous de la température de recristallisation peut empêcher l'écrouissage des matériaux pendant la coupe. L'ensemble de ces deux actions diminue la chaleur produite et donne des conditions favorables pour l'usinage [66]. L'échauffement du matériau peut être effectué avant ou pendant l'usinage, sur la pièce dans son intégralité ou seulement sur la surface de la pièce. L'échauffement du matériau peut être réalisé par flamme, résistance électrique, laser, etc. K. P. Maity et P. K. Swain (2008) [95] ont étudié les comportements d'une pièce préchauffée d'acier à haute teneur en magnésium pendant le processus de tournage. Les résultats de leur étude démontrent que l'échauffement du matériau a un effet sur la durée de vie de l'outil plus important que l'effet d'autres facteurs : vitesse de coupe, avance par tour, profondeur de coupe. Les

avantages connus du préchauffage des matériaux sont [66] : (1) la diminution de l'effort de coupe; (2) l'augmentation de la durée de vie de l'outil; (3) l'absence d'écrouissage du matériau. Les inconvénients sont [66] : (1) l'augmentation de la température de l'outil en contact direct avec la source de l'échauffement; (2) les coûts des équipements; (3) la dangerosité potentielle.

La combinaison de cette méthode avec le pré-refroidissement de l'outil produit des résultats excellents et la performance de coupe est fortement améliorée.

### 1.2.5 Usinage à grande vitesse

Le phénomène d'usinage à grande vitesse, qui a changé révolutionnairement la productivité du processus d'usinage, est une solution pour diminuer la chaleur produite au cours de la coupe. L'idée fondamentale de l'usinage à grande vitesse est celle de Salomon (1931). Salomon propose qu'il y ait une valeur intermédiaire et critique pour la vitesse de coupe et l'augmentation de la vitesse de coupe jusqu'à cette valeur augmente la température. Lorsque la vitesse de coupe augmente à partir de ce point, il y a une réduction de la température (voir figure 1.26) [96]. Ce phénomène n'est pas accepté par tous les chercheurs.

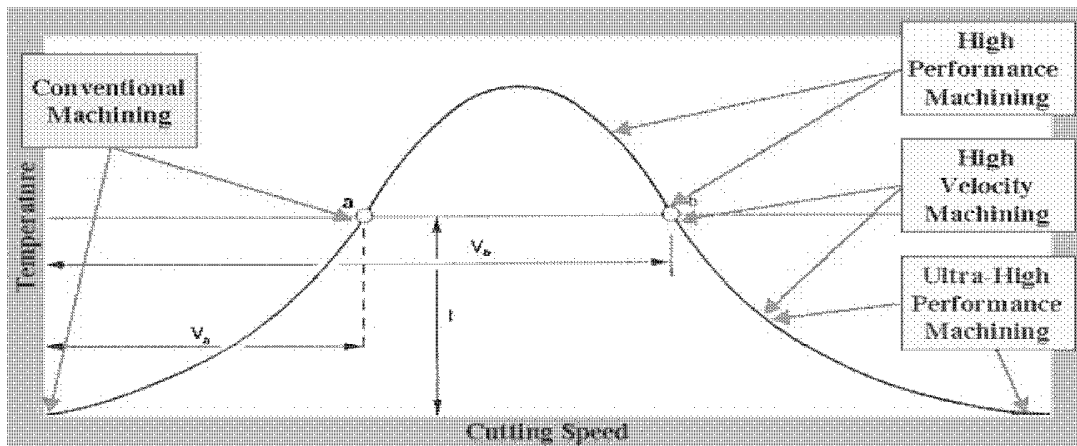


Figure 1.26 : Phénomène de Salomon [97].

Selon les résultats de l'expérience de D. G. Thakur, B. Ramamoorthy et L. Vijayaraghavan (2009) [98] (pièce : Inconel 718, processus : tournage, plaquette : carbure de tungstène (K20)), nous concluons qu'une augmentation de la vitesse donne les résultats suivants :

(1) Le taux du cisaillement et de la déformation plastique augmente [61] donc, le taux de génération de chaleur augmente, mais la dissipation de chaleur est faible à cause de la faible

conductivité thermique d'Inconel 718. Ce phénomène se traduit par une augmentation de la température du matériau, suivie par l'adoucissement du matériau, ce qui diminue l'effort de coupe (voir figure 1.27).

(2) L'effort de coupe diminue et par conséquent le travail effectué sur l'unité de longueur de coupe diminue. Il en résulte la diminution de la déformation plastique dans le plan de cisaillement (première zone) et ensuite le raccourcissement du plan de cisaillement, par conséquent, l'angle de cisaillement augmente (voir figure 1.28).

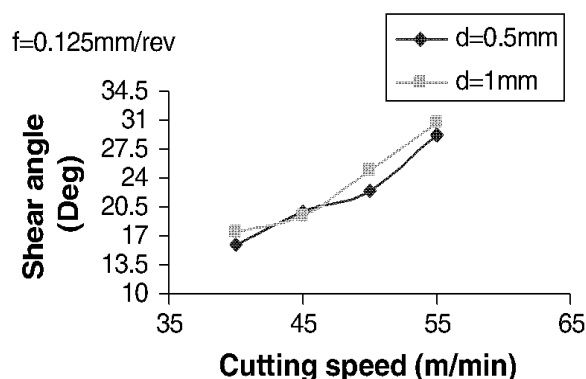
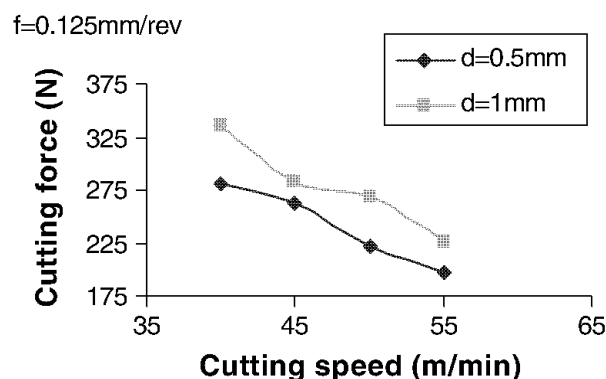


Figure 1.27 : Effort de coupe par UGV [98].

Figure 1.28 : Angle de cisaillement par UGV [98].

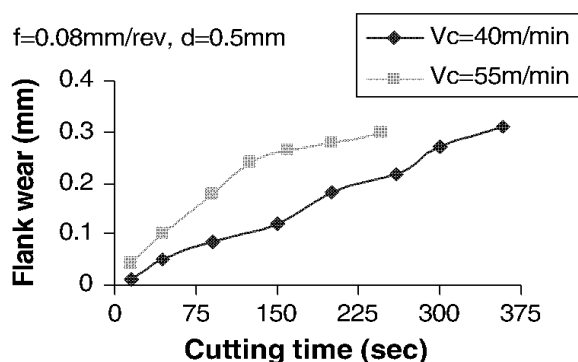
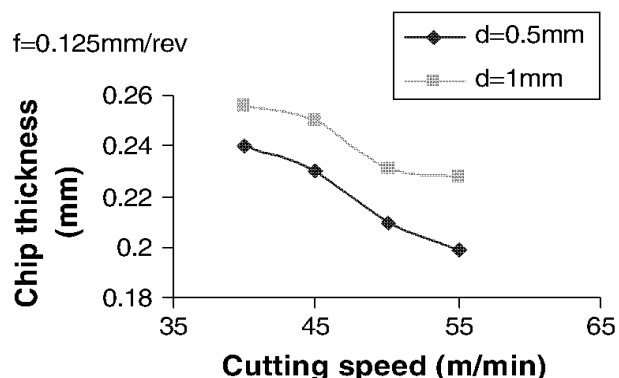


Figure 1.29 : Épaisseur de copeau par UGV [98].

Figure 1.30 : Usure de l'outil par UGV [98].

(3) La diminution de l'effort de coupe et en même temps l'augmentation de l'angle de cisaillement diminuent la force normale dans la zone de grippement sur la face de coupe de l'outil. Cette modification diminue la déformation plastique du copeau dans la deuxième zone. La diminution de la déformation plastique dans la première et la deuxième zone produit un copeau plus mince (voir figure 1.29).



(4) Une température plus élevée dans la zone de coupe. Par conséquent, une augmentation de la température d'outil qui facilite l'usure de l'outil de coupe (voir figure 1.30).

Les avantages de l'usinage à grande vitesse sont les suivants : (1) l'augmentation de la productivité; (2) la diminution des efforts de coupe; (3) l'amélioration de l'état de surface usinée. Les inconvénients sont : (1) le raccourcissement de la durée de vie de l'outil; (2) la production d'aérosols et de brouillard.

## **1.2.6 Modification de l'outil**

La partie la plus indésirable de la production de chaleur réalisée pendant la coupe est l'augmentation de la température de l'outil. Elle accélère l'usure de l'outil. De plus, l'outil utilisé produit une chaleur plus élevée pendant la coupe. L'outil de coupe peut être protégé contre la chaleur produite par les changements de ses caractéristiques physiques, chimiques ou géométriques. Les modifications de l'outil peuvent être catégorisées : (1) le matériau de l'outil; (2) le revêtement de l'outil; (3) la géométrie de l'arête de coupe et/ou de l'outil.

### **1.2.6.1 Matériau de l'outil**

Un matériau d'outil idéal associe une dureté élevée, une bonne endurance, une stabilité chimique et une résistance à l'usure élevée aux températures ambiantes et élevées. Son comportement doit être considéré comme une fonction de la température [69, 99]. Généralement, la dureté et l'endurance sont des propriétés opposées. Il n'y a aucun matériau qui atteint ces deux conditions simultanément [61, 69]. Le tableau 1.6 présente les différents matériaux d'outil et montre leurs propriétés. La figure 1.31 présente leurs duretés en fonction de la température. Les comportements d'un matériau d'outil peuvent être différents selon sa cristallisation, sa structure et son homogénéité.

R. T. Coelho & S. Yamada & D. K. Aspinwall & M. L. H. Wise (1995) [100] ont comparé des outils de différents matériaux pendant le processus de perçage d'un matériau CMAIP-SiC et leurs résultats sont vraiment intéressants. L'outil diamant polycristallin a une durée de vie 300 fois plus élevée que l'outil acier rapide et 6-18 fois plus que l'outil carbure de tungstène, Figure 1.32 présente une partie de leur travail.

Tableau 1.6 : Matériau d'outil [99].

Hardness	Wear resistance	Tool material	Toughness
↓	↓	Carbon steels	↑
		High-speed steel	
		Cast alloys	
		Tungsten carbides	
		cermets	
		Titanium carbides	
		ceramics	
		Cubic boron nitride	
		Polycrystalline diamond	
		Single-crystal diamond	

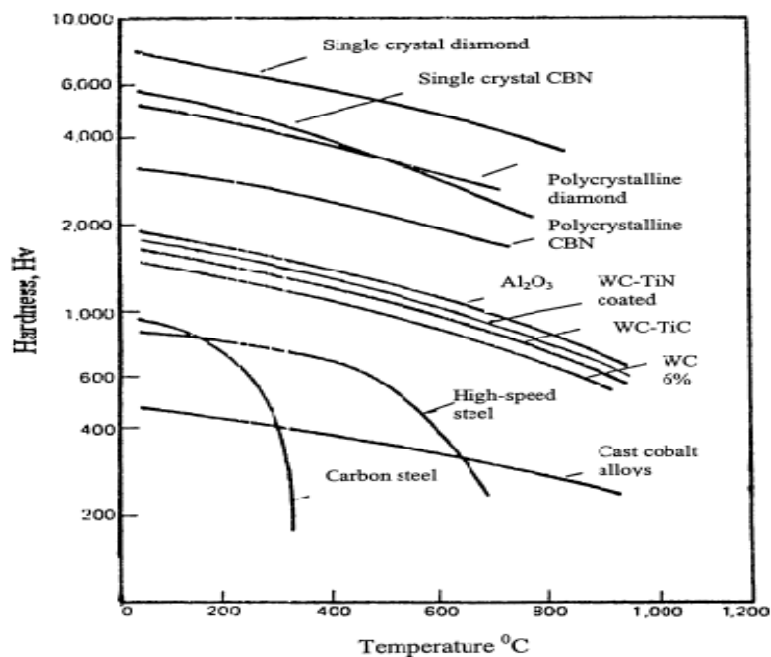


Figure 1.31 : Comportement thermique des matériaux d'outil [99].

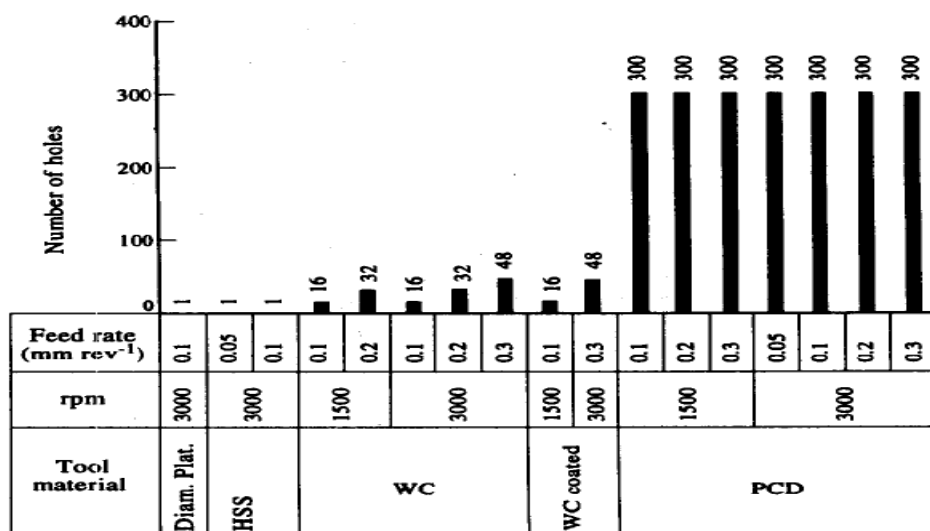


Figure 1.32 : Comparaison de l'efficacité des différents matériaux d'outil [100].

### 1.2.6.2 Revêtement de l'outil

L'utilisation des nouveaux matériaux pouvant travailler à hautes températures (céramique, diamant polycristallin, nitrure de bore, etc.) augmente vraiment la performance d'usinage. Mais malheureusement, ils sont très sensibles aux chocs mécaniques ou thermiques à cause de leur nature [61, 69, 99]. Pour résoudre ce problème, on utilise une ou plusieurs couches de ces

matériaux sur une structure de matériau possédant une grande endurance (carbure de tungstène, acier rapide, etc.). Ce nouvel outil revêtu peut supporter des chocs mécaniques et thermiques. À hautes températures, il présente une dureté élevée, une bonne résistance à l'usure et une stabilité thermique [61, 69, 99]. En 1998, un travail [101] a été effectué concernant les influences du revêtement de l'outil sur l'usinage. Ses résultats sont présentés dans la figure 1.33. On peut voir qu'un bon revêtement peut diminuer les frottements aux interfaces, la chaleur produite, la chaleur transférée à l'outil, la diffusion, etc.

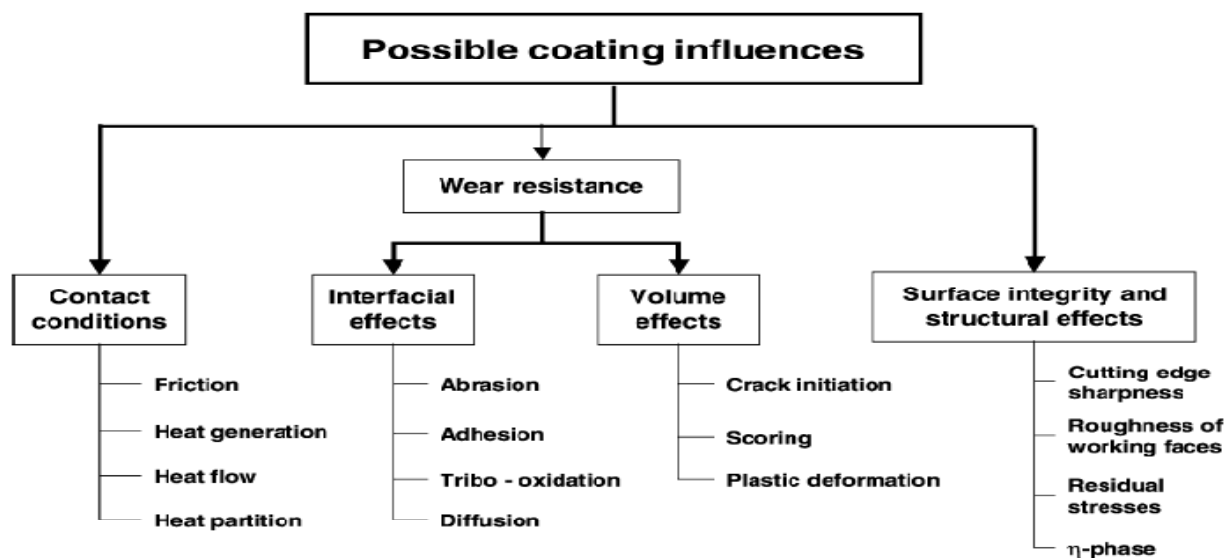


Figure 1.33 : Influences probables du revêtement d'outil [101, 102].

### 1.2.6.3 Géométrie de l'arête de coupe et d'outil

Comme nous avons vu, la chaleur est produite par deux processus physiques : la déformation plastique au sein du copeau et le frottement à l'interface outil-pièce-copeau. La déformation plastique du matériau est fortement dépendante de la géométrie de l'arête de coupe et le frottement dans l'interface outil-copeau-pièce est fortement influencé par la géométrie de l'outil. C'est pourquoi de nombreuses études ont été effectuées sur ce sujet. Le résumé de ces études est le suivant : (1) l'augmentation de l'angle de chanfrein, à faible débit de copeau, a une forte influence sur l'augmentation de l'effort de coupe (la chaleur produite augmente) [66]; (2) l'augmentation du diamètre de honde augmente l'effort de coupe et la chaleur produite [66] (voir figure 1.34); (3) le changement de l'angle de coupe, de la dépouille et du taillant, du rayon d'arête, du brise copeau et de la courbure de la face de coupe peuvent modifier la valeur de chaleur produite [61, 99, 103].

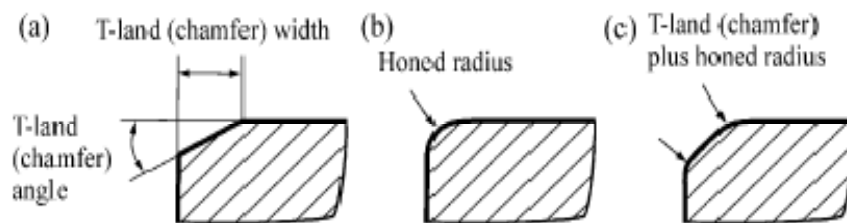


Figure 1.34 : Géométrie de l'arête de coupe [104].

Les avantages de la modification de l'outil sont : (1) la diminution de la chaleur produite; (2) la prolongation de la durée de vie de l'outil; (3) l'amélioration de l'état de la surface usinée.

### 1.2.7 Outil rotatif

Le mouvement de l'arête de coupe pendant l'usinage est un nouveau concept. Comme les figures 1.35 et 1.36 le montrent, l'outil de coupe tourne sur son axe pendant l'usinage. La rotation peut être auto propulsée ou réalisée par un système externe [105]. L'arête de l'outil de coupe est impliquée dans une opération d'usinage, mais pour une période très brève, suivie d'une période de repos prolongée qui autorise la conduction de l'énergie thermique, cela diminue la température de l'outil [68].

Les résultats de la recherche de E. O. Ezugwu (2007) [106] confirment que l'outil rotatif diminue la chaleur produite et la température pendant la coupe (environ 25 %), augmente la durée de vie de l'outil (environ 350 %) et améliore l'état de surface. Le fonctionnement d'un outil rotatif est fortement dépendant de la forme physique de l'outil, particulièrement de l'angle de dépouille [106]. L'outil rotatif, en cas d'application correcte, offre les avantages suivants [105, 106] : (1) l'augmentation de la durée de vie de l'outil; (2) la diminution de la chaleur produite; (3) l'amélioration de l'usinabilité particulièrement lors d'usinage de matériaux difficiles à usiner comme les alliages à base de titane et à base de nickel; (4) l'amélioration de l'état de surface.

Les inconvénients connus de l'outil rotatif sont [105, 106] : (1) la diminution de la précision d'usinage; (2) l'augmentation de la possibilité de broutement; (3) l'usinage de certaines formes n'est pas possible.

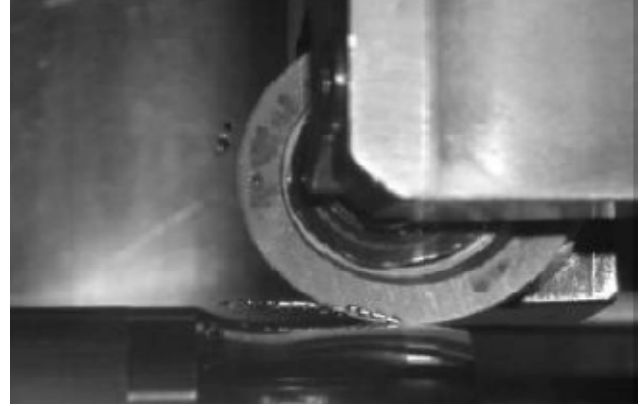
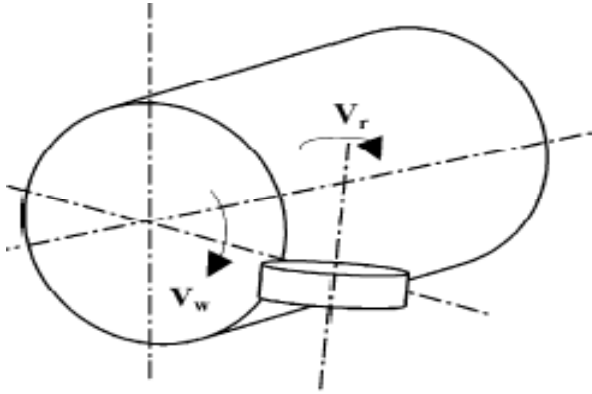


Figure 1.35 : Schéma d'un outil rotatif [105].

Figure 1.36 : Outil rotatif pendant usinage [105].

### 1.2.8 Usinage associé à des vibrations ultra-soniques

L'usinage par outil vibrant est une technique utilisée pour l'amélioration de l'opération d'usinage en diminuant la chaleur produite et l'effort de coupe. Dans cette méthode d'usinage, une vibration à haute fréquence (environ 20 kHz) et très petite amplitude (environ 10  $\mu\text{m}$ ) est appliquée à l'outil de coupe. Cette technique améliore l'usinage des matériaux comme les matériaux durs, les plastiques fragiles, les alliages aéronautiques haute résistance, les composites et les céramiques [66].

La figure 1.37 montre un schéma d'usinage associé à la vibration ultra-sonique (UAVU) et la figure 1.38 présente l'effort de coupe dans cette condition. Les trois paramètres fréquence de vibration, amplitude de vibration et vitesse de coupe ont des influences considérables sur l'efficacité d'UAVU [107]. Les avantages d'UAVU sont [66, 107, 108]: (1) la diminution de la chaleur produite; (2) la diminution de l'effort de coupe; (3) la forte diminution de l'usure de la face de dépouille; (4) l'élimination de la formation de l'arête rapportée et par conséquent la grande amélioration de l'état de surface. Les inconvénients d'UAVU sont les suivants [66, 107, 108]: (1) les équipements nécessaires sont chers; (2) la rigidité nécessaire pour la machine d'outil est supérieure; (3) les changements des conditions de coupe ou chaque changement sur la machine nécessitent un nouveau réglage du système de vibration (diminution des temps actifs des machines); (4) la limitation de la vitesse de coupe maximale.

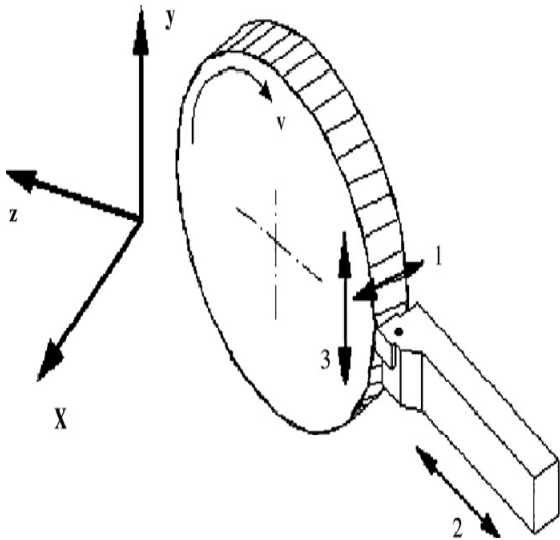


Figure 1.37 : Schéma de UAVU [108].

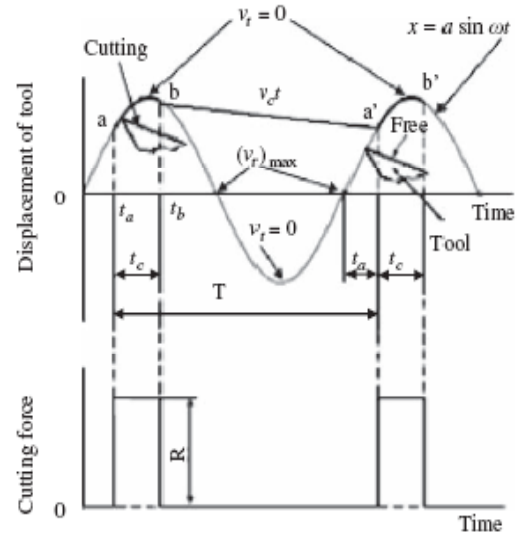


Figure 1.38 : Effort de coupe en UAVU [107].

### 1.3 Niveau d'application industrielle

Nous considérons deux critères pour déterminer le niveau d'application industrielle pour chaque solution, premièrement le nombre de recherches effectuées sur chaque solution et deuxièmement les dépenses industrielles pour chaque solution :

1. notre recherche sur les articles publiés relatifs aux solutions déjà discutées (dans l'intervalle 1999-2009, 1147 articles) montre qu'environ 57 % des articles concernent l'arrosage (applications, innovations, optimisations);
2. une recherche publiée en 2009 [43] confirme qu'encore 1 à 3 % du total des dépenses annuelles des grands fabricants des pièces usinées est relié au fluide de coupe.

Le plus important est la tendance des industries à utiliser du fluide de coupe (arrosage) en accompagnement d'autres solutions déjà présentées. Par exemple, l'utilisation des outils revêtus pour usiner sous arrosage, ou l'arrosage pendant usinage par outil rotatif, etc.

Selon nos études, l'arrosage parmi les autres solutions étudiées a le niveau d'application industrielle le plus élevé.

Nous avons déjà vu que l'arrosage a des effets nocifs (coût élevé, dangereux sur la santé des ouvriers et l'environnement, choc thermique sur outil, etc.). Il est donc normal de poser la

question : Comment l'arrosage, avec ses effets nocifs, peut rester au premier niveau d'application industrielle ?

La réponse à cette question est le sujet de la prochaine section.

## 1.4 Diminution des effets nocifs de l'arrosage

L'idée principale pour diminuer les effets nocifs de l'arrosage est très simple : utiliser la quantité nécessaire de fluide de coupe appropriée, au lieu nécessaire et à un temps déterminé. Cet arrosage s'appelle la lubrification minimale (LM). Pour connaître les influences de la LM sur les performances d'usinage, nous devons choisir un matériau (dans notre cas CsMAIP-SiC) et ensuite faire une revue des articles publiés. Le nombre d'études sur l'application de la LM lors de l'usinage des CMAIP-SiC est relativement faible et la plupart d'entre elles utilisent un outil à acier rapide sans revêtement ou à carbure de tungstène sans revêtement [109].

H. A. Kishawy & M. Dumitrescu (2005) [110] ont comparé les effets de l'arrosage copieux et de la LM sur l'usure d'outil, la formation de copeau, la rugosité de surface usinée et l'effort de coupe. Le processus était le fraisage d'un CMAIP-SiC (A356, % 6.69 si, 0,44 % mg, 0,02 % Cu) avec un outil à carbure sans revêtement. Les résultats montrent que la LM comparée à l'arrosage copieux réduit l'effort de frottement, l'usure sur la face de dépouille de l'outil et améliore l'état de la surface par rapport à l'usinage à sec.

J. F. Kelly & M. G. Cotterell (2002) [111] ont étudié les effets de la LM lors du perçage d'un alliage aluminium-magnésium avec un outil à acier rapide sans revêtement. Ils ont comparé la force d'avance et la rugosité de surface usinée entre les conditions d'arrosage copieux (huile soluble minérale, débit de 5.2 l/min), de LM (brouillard, huile végétale, 20 ml/h), à sec et à air comprimé. Les résultats montrent que l'arrosage et la LM diminuent la force d'avance et améliorent la rugosité de la surface usinée par rapport à l'usinage à sec et sous arrosage par air comprimé.

D. U. Braga & A. E. Diniz (2002) [112] ont évalué les performances du perçage sous différents modes d'arrosage (LM et arrosage copieux). Le perçage a été effectué sur un CMAIP-SiC (A356) avec deux outils : (1) carbure revêtu par diamant; (2) carbure sans revêtement. Leur évaluation a montré que la LM diminue légèrement l'énergie consommée. La force d'avance est vraiment

proche pour l'arrosage copieux et la LM. Ils ont montré que l'application de la LM est avantageuse pour le perçage des CMAIP-SiC.

En résumé, les articles publiés montrent (il y a quelques exceptions) que la LM augmente la performance pendant l'usinage de CMAIP-SiC.

## **1.5 Critères de la performance d'usinage**

Selon les articles étudiés, nous pouvons dire que la performance d'usinage est une indication qui montre l'effet de chaque opération unique d'usinage sur l'ensemble des opérations dans la chaîne de production. Cela déterminera, en considérant la valeur ajoutée aux chaînes de production, les caractéristiques demandées pour le produit, les activités de mesure et le contrôle de la qualité de processus.

Les auteurs des recherches publiées ont considéré quelques variables comme critères de la performance de coupe, ils sont parfois différents. En résumé, les critères plus utilisés sont les suivants [9, 57, 59, 78, 80, 83, 113-124] :

1. usure de l'outil (durée de vie de l'outil);
2. intégrité de la surface usinée;
3. efforts de coupe (puissance consommée);
4. formation de copeau (forme du copeau);
5. précision de la pièce usinée.

## **1.6 Composite à matrice d'aluminium**

Les composites à matrice métallique (CsMM) appartiennent au groupe des matériaux à hautes performances. Ils combinent une matrice métallique avec des renforcements de céramique dur ou un matériau doux. Les CsMM, à cause de leurs propriétés exceptionnelles, ont remplacé plusieurs matériaux traditionnels dans divers domaines d'applications tels que l'aéronautique, l'automobile, etc. [125].

Les propriétés favorables de l'aluminium (légèreté, endurance, résistance à la corrosion, etc.) sont les raisons de son utilisation habituelle en fabrication des CsMM. Les composites à matrice Aluminium (CsMAI) sont connus et commercialisés à cause de leur facilité de production, de leur



prix et de leurs propriétés mécaniques. Les propriétés mécaniques des CsMAI, par rapport aux matériaux non renforcé, les rendent attrayants pour les raisons suivantes [5, 126-128]:

1. résistance plus élevée;
2. rigidité améliorée;
3. densité plus faible;
4. comportement amélioré aux températures élevées;
5. coefficient contrôlable de l'expansion thermique;
6. résistance à la fatigue et aux chocs supérieure;
7. résistance à l'usure améliorée;
8. capacité d'amortissement corrigé.

L'augmentation de l'application des CsMAI a créé de nouveaux problèmes industriels, particulièrement dans la fabrication par usinage. Les problèmes les plus importants engendrés pendant l'usinage de CsMAI peuvent être présentés dans deux catégories ci-dessous :

1. L'intégrité de la surface usinée, le composite, par définition, est un matériau hétérogène, inhomogène et anisotrope [3, 5, 129]. Ces caractéristiques expliquent l'intégrité élevée et non contrôlable de la surface du composite usiné. Remplacer les fibres de renforcement par des particules de renforcement diminue considérablement les effets d'inhomogénéité et d'anisotropie. Malgré l'utilisation des particules de renforcement dans les CsMAIP, les effets d'hétérogénéité existent encore : rugosité de la surface (voir figure 1.39), contrainte résiduelle surfacique et endommagement subsurfacique [130-139].
2. Usure d'outil : il y a une usure excessive de l'outil de coupe due à la haute dureté et à la résistance des matériaux de renforcement ( $\text{SiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Le type dominant de l'usure d'outil est l'abrasion mécanique produit par le frottement interfacial [126, 127, 131, 140-146]. Le frottement à l'interface outil-copeau-pièce peut être considéré comme l'abrasion entre deux éléments et le roulement entre trois éléments [15] (voir figure 1.40). Nous pouvons diminuer l'usure excessive de l'outil en utilisant des nouveaux types d'outil comme : le diamant polycristallin (PDC), le nitrure de bore cubique (CBN), le nitrure de bore cubique polycristallin (PCBN), le dépôt chimique en phase vapeur

(CVD) et le dépôt physique en phase vapeur (PVD) (les matériaux utilisés pour le dépôt sur l'outil sont :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{AlCrN}$ ,  $\text{AlTiN}$ ,  $\text{TiC}$ , etc.) [2, 117, 120, 121, 125, 135, 140, 147-157]. Mais les coûts de ces outils sont très supérieurs aux outils réguliers. L'usure excessive de l'outil reste encore un problème de l'usinage des CsMAI.

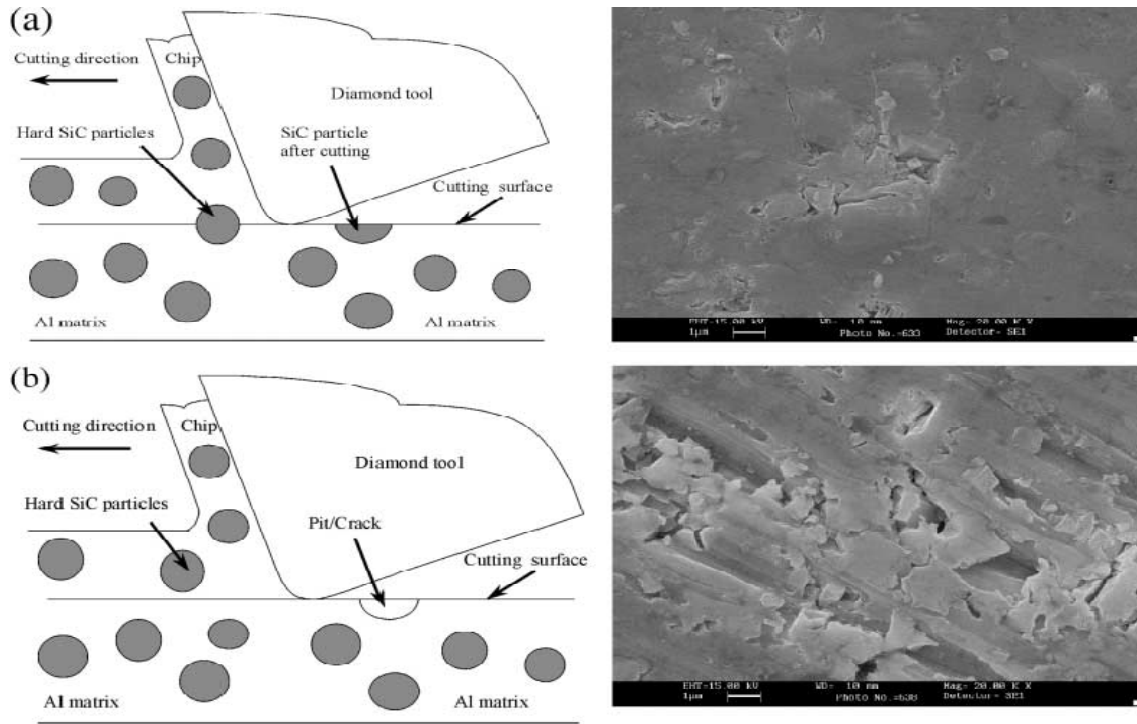


Figure 1.39 : Rugosité de surface en usinage des CsMAIP (a) coupe des particules (b) enlèvement des particules [138].

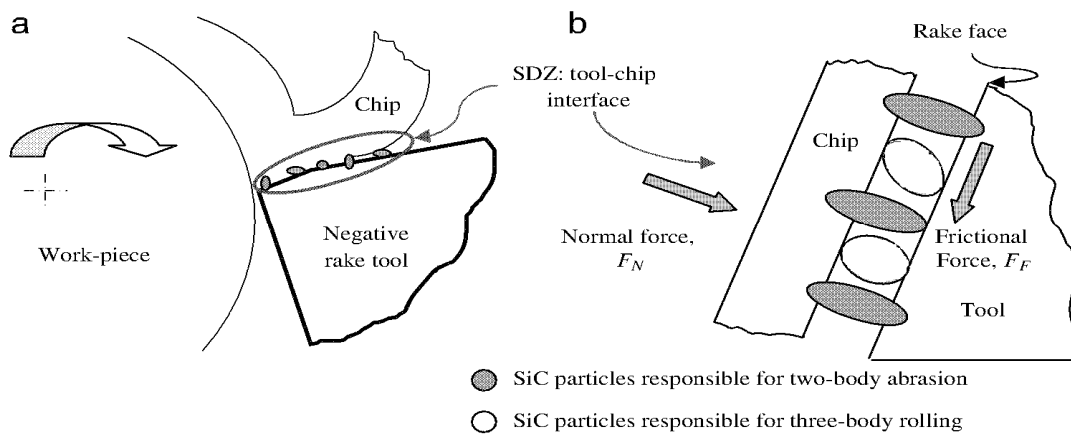


Figure 1.40 : (a) Schéma de l'abrasion d'outil, (b) deux effets différents des particules [15].

Malgré les problèmes mentionnés, l'application des CsMAIP se développe de plus en plus [5]. Certaines applications les exposent aux conditions d'usure par abrasion (mouvement alternatif) et

parfois aux conditions d'usure aux températures élevées. Dans ces conditions, la lubrification externe peut être efficace. Mais pour les pièces qui ont périodiquement besoin de lubrification et en particulier pour les pièces d'usures qui ne sont pas facilement accessibles, la lubrification externe n'est pas favorable. C'est pourquoi le CsMAIP autolubrifiant (CsMAIPA) a été conçu, la figure 1.41 montre une micrographie de CMAIPA-SiC (Al6061, SiC 10 % volumique, Graphite revêtu par Nickel 5 % volumique). Le lubrifiant solide constituant les CsMAIPA peut être libéré automatiquement lors du processus d'usure et lubrifier l'interface [128]. Les lubrifiants solides les plus connus sont le graphite, le sulfure de molybdène, le nitrure de bore et le PTFE (polytétrafluoréthylène). Le graphite est le plus favorable parce qu'il fonctionne bien à température élevée, en atmosphère humide et oxydante. L'utilisation directe de ses particules aux matrices métalliques (aluminium) aboutit à une inhomogénéité du composite (l'effet des différentes masses volumiques et la faible mouillabilité du graphite par aluminium) [128, 158]. Il faut donc utiliser un revêtement (nickel) sur les particules de graphite qui permet d'avoir un composite homogène et d'obtenir des tensions inter-faciales fortes (NiAl) [81, 159, 160].

Ce nouveau composite se nomme "GrA-Ni NX.MG<sup>®</sup>" où N, X et M sont respectivement le pourcentage volumique des particules de renforcement, le matériau de renforcement et le pourcentage volumique de graphite [159]. GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> est un bon exemple de CsMAIPA qui contient les deux particules suivantes : (1) le SiC à une taille de l'ordre de 14  $\mu\text{m}$ ; (2) le graphite à une taille de l'ordre de 80  $\mu\text{m}$  revêtu par une couche de Nickel à l'épaisseur de 5-10  $\mu\text{m}$  (50 % massique de Nickel et Graphite). Le tableau 1.7 présente les caractéristiques physiques les plus utilisées du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>.

Plusieurs études expérimentales et numériques ont mis l'accent sur l'usinage des CsMAIP. Elles ont évalué les variables d'usure de l'outil, d'intégrité de la surface et des efforts de coupe. Elles ont parfois essayé de modéliser, de simuler et de prédire ces variables. Les CsMAIP-SiC ont été les plus populaires parmi ces études d'usinage, mais ces études n'ont pas une vue pratique et industrielle. En réalité, dans toutes les études publiées, seul le comportement des critères de performance a été étudié et la performance d'usinage n'est jamais discutée.

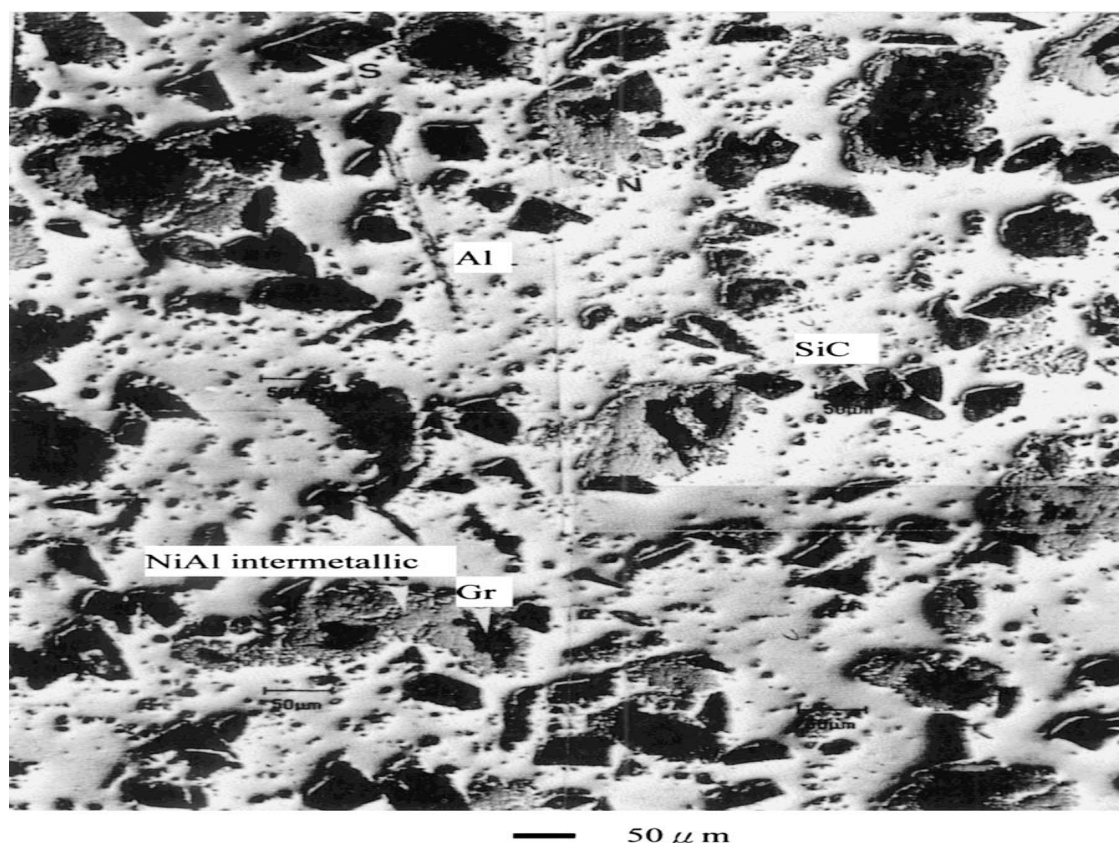


Figure 1.41 : Micrographie du CMAIPA-SiC (lubrifiant solide : graphite revêtu par nickel) [128].

L'orientation vers les CsMAIPA et surtout vers les CsMAIPA-SiC dans les articles est rare à cause de la complexité d'usinage et de la mauvaise connaissance de leurs propriétés (différents coefficients de dilatation thermique, énergie de rupture, etc.). Selon notre recherche bibliographique effectuée, il n'y a aucune recherche sur l'influence du mode d'arrosage sur la performance d'usinage des CsMAIPA-SiC.

Tableau 1.7 : Caractéristiques physique de GrA-Ni 10S.4G® [6]

	GrA-Ni 10S : 4G	A356
<b>Room temperature</b>		
UTS, MPa	275	262
Yield strength, MPa (0.2% offset)	260	185
Elongation, %	0.55	5.0
Hardness (HRB)	71	57
Density, g cm <sup>-3</sup>	2.73	2.68
<b>316°C (600°F)</b>		
UTS, MPa	110	30
Yield strength, MPa (0.2% offset)	74	25
Elongation, %	1.1	60

## 1.7 Plan d'expérience, méthode Taguchi

Selon l'auteur du livre : Pratique des plans d'expériences [161], la définition d'expérience est : "un fait provoqué ou attendu pour vérifier une hypothèse, une loi, et arriver ainsi à une connaissance théorique de la façon dont se passent les choses" [161]. Pour faire une expérience, il faut bien connaître le problème (sujet de l'expérience), le but de l'expérience (objectifs), les variables qui sont la réponse du système aux conditions expérimentales (variables dépendantes) et les variables qui influencent la variation de réponse (variables indépendantes) et ensuite réaliser les essais [162]. Cette manière de réaliser une expérience peut être appliquée seulement aux cas très simples (une ou deux variables indépendantes et dépendantes). Mais en général la nature des problèmes nécessite la considération de l'influence d'un grand nombre de variables sur les différentes réponses d'un système. C'est la raison pour laquelle nous sommes obligés d'utiliser un plan d'expérience. Il optimise le temps et le coût de l'expérience et il facilite l'analyse des réponses [162]. Le plan d'expérience est un outil mathématique et organisationnel qui permet de qualifier et de quantifier l'influence de chacune des variables indépendantes sur les variables dépendantes. Son but est d'obtenir des informations relatives au système ou au phénomène que l'on observe avec un minimum d'essais [161].

Parmi les méthodes de planification de l'expérience, la méthode Taguchi a un très bon potentiel pour optimiser l'expérience, cribler les variables indépendantes afin de déterminer les niveaux d'influence de chacune sur les réponses et prédire les comportements du système observé aux conditions désirables [161-163].

Les compétences de la méthode Taguchi la rendent une option intéressante pour les chercheurs dans le domaine de la fabrication (par exemple : usinage) où il faut maîtriser beaucoup de variables afin d'optimiser la production. Cette méthode aide à trouver facilement les variables contrôles et à déterminer les conditions nécessaires pour obtenir l'efficacité maximale du processus [161, 163].

## 1.8 Conclusion de la revue de littérature

L'arrosage est une solution plus pratique et la plus utilisée pour diminuer et transférer la chaleur produite pendant l'usinage. Mais il a certains effets nocifs qui doivent être éliminés. La lubrification minimale (LM) est une nouvelle méthode d'arrosage qui peut diminuer ces effets.

Les avantages de la LM en usinage des CSMAI sont confirmés par la majorité des chercheurs. Mais la plupart des études sur les CSMAI sont concentrées sur l'usinage des CsMAIP-SiC et le nombre des études consacrées à l'usinage de CMAIPA-SiC et en particulier GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> est vraiment faible (j'ai trouvé seulement deux articles sur ce sujet). De plus, il n'y a aucune étude sur l'influence des différents modes d'arrosage sur la performance d'usinage de CsMAIPA-SiC. Cependant, compte tenu des données collectées, il semble qu'il faut reposer la question de recherche plus précisément et plus pratique :

\*\*Est-ce que l'arrosage a une influence significative sur la performance de l'usinage des pièces en CsMAIPA-SiC? Si oui, quel mode d'arrosage produit la meilleure performance pour l'usinage des CsMAIPA-SiC?

Quelles sont les influences des différents modes d'arrosage sur la performance d'usinage des composites à matrices d'aluminium (GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>) ?

Selon notre connaissance actuelle, la nature de GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> qui exige l'existence de deux particules (SiC et Graphite revêtu par Nickel) peut vraiment compliquer les phénomènes suivants :

1. Mécanisme de la formation de copeau. Les liaisons métalliques à l'interface d'Aluminium-Nickel (Al-Ni) et les particules de graphite qui ont des fragilités naturelles diminuent la ductilité du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>, donc les copeaux sont plus cassants. V. Songmene et M. Balazinski (1999) [81] ont montré que pendant l'usinage d'une pièce en GrA-Ni<sup>®</sup>, l'influence des particules de graphite revêtues de nickel sur le mécanisme de la formation de copeau est plus importante que les autres facteurs.
2. Mécanisme de frottement à l'interface outil-copeau-pièce. La combinaison des particules libérées de graphite et des particules de SiC qui sont retirées de leurs places au cours de l'usinage produisent un milieu instable et non prédictible. Le nombre, la forme et le pourcentage des différentes particules qui existent entre les surfaces peuvent fortement influencer le mécanisme de frottement à l'interface outil-copeau-pièce. L'usure de l'outil de coupe et les efforts de coupe sont dépendants du mécanisme de frottement. Donc, ils ne sont pas des variables totalement contrôlables, ce qui diminue le niveau de confiance pour les prédire au cours de l'usinage d'une pièce en GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>.

3. L'état de la surface usinée. Le GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> a été créé pour la fabrication des pièces d'usures. Donc, les particules de graphite doivent se libérer facilement, cette propriété ainsi que la probabilité d'enlever des particules de SiC lors de l'usinage produisent des cavités sur la surface usinée. La distribution et la taille des cavités sur la surface usinée ne sont pas contrôlables et prédictibles. Par conséquent, l'état de la surface n'est pas seulement une fonction des conditions de coupe. La structure microscopique de GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> et la distribution des particules (SiC et Gr-Ni) ont un fort effet sur l'état de la surface usinée.

Il y a de nombreuses questions à poser sur l'usinage de CsMAIPA-SiC, par exemple :

1. Quels sont les effets de la taille et de la forme des particules de graphite sur les différentes variables pendant l'usinage?
2. Comment le pourcentage massique ou volumique de Nickel affecte la formation des liaisons intermétalliques Al-Ni?
3. Est-il possible que lors de l'usinage les particules de Gr-Ni soient retirées de leurs places entièrement? Si oui, quels sont les facteurs qui déterminent le taux de cet enlèvement? Quels sont les effets de cette forme d'enlèvement des particules Gr-Ni sur la propriété d'autolubrification du CsMAIPA-SiC et par conséquent sur les critères de la performance d'usinage?
4. Quel est l'effet des particules Gr-Ni sur la production de la chaleur au cours de l'usinage?
5. Est-ce que la présence des particules de Gr-Ni peut influencer le mécanisme de la dispersion de la chaleur? Si oui, de quelle manière?

La complexité du processus de l'usinage des CsMAIPA-SiC et les nombreuses questions sans réponse montrent qu'il existe une vaste place pour réaliser des projets de recherche sur l'usinage des CsMAIPA-SiC.

## CHAPITRE 2 DÉFINITION DU PROBLÈME ET LES OBJECTIFS

### Introduction

La question de recherche et une revue de littérature ont été présentées dans le chapitre 1. Parmi les études publiées, aucun travail ne traite de l'influence du mode d'arrosage sur la performance d'usinage du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>.

Ce chapitre présente trois points essentiels. Premièrement, nous présentons une définition du problème, puis son niveau d'importance. Deuxièmement, nous présentons les objectifs généraux et spécifiques. Troisièmement, nous mettons en question le type et la méthode de notre recherche.

### 2.1 Définition du problème

L'augmentation de l'application des nouveaux matériaux et particulièrement les CsMAIPA-SiC, engendre de nouveaux problèmes pour les manufacturiers, surtout dans le domaine de l'usinage. L'usinage des CsMAIPA-SiC (GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>) produit une usure excessive de l'outil de coupe et une intégrité de la surface usinée incontrôlable.

La solution possible et la plus connue est l'usinage du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> avec arrosage. Mais cette solution n'est jamais mise en application donc :

- **la première partie de notre problème concerne la détermination des influences de l'arrosage sur les critères de la performance d'usinage du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>.**

Actuellement, les industriels sont très prudents pour l'utilisation des fluides de coupe parce qu'il faut :

1. respecter la réglementation environnementale des états;
2. réduire les coûts de production;
3. assurer de bonnes conditions d'hygiène et de santé pour les opérateurs;
4. réduire ou supprimer les risques de pollution du milieu naturel.

Ces conditions mènent vers un usinage plus propre et écologique donc :



- **la deuxième partie de notre problème concerne la comparaison des influences de l'arrosage copieux et LM sur les critères de la performance de l'usinage du GrA-Ni 10S.4G®.**

L'augmentation de la productivité ainsi que la diminution du coût du produit sont deux obligations pour l'industrie donc :

- **la troisième partie de notre problème concerne la mise au point d'une méthodologie d'optimisation pour les conditions de coupe. Ce qui doit lier les critères de la performance de l'usinage avec la productivité et le coût de produit.**

Actuellement, il y a une tendance très forte pour réduire la masse des automobiles et des avions afin de minimiser leurs consommations d'énergie. Cela oblige les industries automobiles et aéronautiques à utiliser de nouveaux matériaux pour répondre à ce besoin. L'utilisation des matériaux composites, notamment les composites à matrice métallique, a augmenté durant les années précédentes. Le niveau d'utilisation industrielle des CsMAIP-SiC est assez élevé pour attirer l'attention des scientifiques (plus de 100 articles par année).

## 2.2 Objectifs généraux

Les objectifs généraux de cette recherche sont :

1. Développer notre connaissance sur l'usinage des pièces en GrA-Ni 10S.4G®. Connaître les problèmes existants dans ce domaine et se familiariser avec les phénomènes physiques et le comportement mécanique d'un composite à matrice métallique au cours du processus d'usinage.
2. Acquérir une connaissance sur la lubrification minimale, ses caractéristiques et ses avantages environnementaux. Connaître les faiblesses de la LM et les variables importantes pour son efficacité tout en réalisant un travail de recherche pratique.
3. Connaître et mettre en action les méthodes du plan d'expérience, les méthodes d'acquisition des données, ensuite se familiariser avec le phénomène de l'optimisation et appliquer ces méthodes.

## 2.3 Objectifs spécifiques

1. Comparer les influences des différents modes d'arrosage sur la performance de l'usinage du GrA-Ni 10S.4G®.
2. Établir une nouvelle méthodologie (optimisation du processus d'usinage en considérant l'effet écologique de l'arrosage) pour évaluer et comparer l'influence du mode d'arrosage sur la performance d'usinage. Le but final est d'optimiser économiquement le processus d'usinage.
3. Bâtir une séance de laboratoire qui présentera un point de vue écologique sur l'arrosage pendant l'usinage. Cela constitue un objectif important de cette recherche. Les conditions d'essais sont choisies dans ce but. La limitation du temps ainsi que la capacité de refaire nos essais pendant une séance de laboratoire nous obligent à faire des essais dans des conditions non réelles (non industrielles). Mais le principal est que la méthodologie établie puisse être utilisée dans les conditions réelles et industrielles.

### 2.3.1 Comparer les influences des différents modes d'arrosage sur la performance d'usinage

L'usinage du GrA-Ni 10S.4G® est plus difficile que celui des métaux courants. L'usure de l'outil excessive et la rugosité de la surface élevée nécessitent la recherche d'une solution. L'arrosage est peut être la solution du problème, il est donc pris en compte dans cette étude. Nous pouvons remarquer, selon la figure 2.1, que suivant le type et la méthode d'application du fluide de coupe, le coût de lubrification représente de 7 à 17 % du coût opérationnel d'usinage. Ce coût élevé n'est pas négligeable et nous encourage à trouver un mode d'usinage plus économique. C'est pourquoi un des objectifs de notre recherche est de comparer les influences des différents modes d'arrosage sur la performance d'usinage afin de trouver le mode le plus économique et le plus écologique.

Une solution de remplacement de l'arrosage traditionnel est la lubrification minimale. La lubrification minimale, dans la majorité de ses applications, diminue le coût opérationnel d'usinage. Simultanément, elle réduit les émissions polluantes générées par l'usinage sous l'arrosage. Elle diminue également les effets néfastes du fluide de coupe sur l'environnement et sur la santé de l'ouvrier. Cette méthode de production est dite « écologique ».

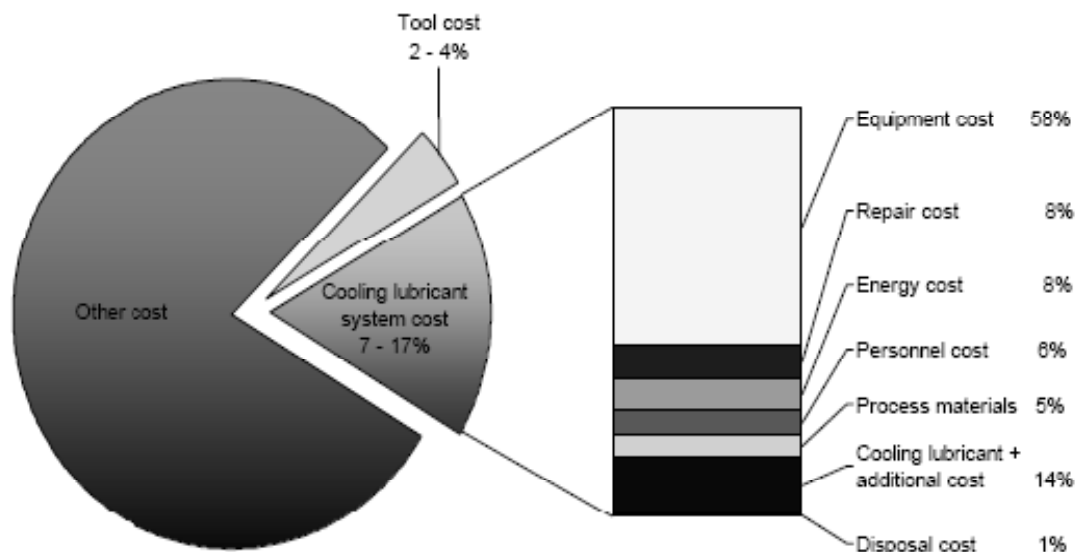


Figure 2.1 : Coûts d'usinage [71].

### 2.3.2 Établir une nouvelle méthodologie

Nous constatons, dans les articles étudiés, que l'évaluation et la comparaison des influences du mode d'arrosage sur la performance d'usinage ne considèrent qu'un ou certains critères de la performance de coupe. À mon avis, l'approche abstraite que les chercheurs ont choisie pour leurs études n'est pas applicable à l'industrie. Le but final de l'industrie, comme toutes les autres activités commerciales, est de réaliser des bénéfices économiques. C'est pourquoi les influences du mode d'arrosage sur les critères de la performance d'usinage doivent se rapporter à une notion économique.

Dans le cadre de cette recherche, nous essayons d'établir une méthode qui nous permet de déterminer les influences des variables sur la totalité de la performance et non sur certains critères de la performance.

### 2.3.3 Bâtir une séance de laboratoire

Pour former des ingénieurs spécialisés, pour soutenir le leadership de l'industrie, il faut leur transmettre les connaissances nécessaires. Les connaissances sur des nouveaux matériaux et les nouvelles technologies peuvent les aider à résoudre les problèmes industriels. Le laboratoire

d'usinage écologique a été bâti afin de donner les connaissances essentielles sur le nouveau mode d'arrosage qui est le plus écologique et le plus économique.

Les objectifs de ce laboratoire sont :

1. montrer aux étudiants l'influence des différents modes de lubrification de coupe sur la performance d'usinage d'un nouveau matériau, le GrA-Ni 10S.4G®;
2. transmettre les notions de base de l'usinage et spécialement l'usinage écologique;
3. familiariser les étudiants aux méthodes de planification d'expérience;
4. donner une connaissance de base sur la méthode d'estimation des coûts d'usinage et sur l'optimisation du processus d'usinage.

## **2.4 Type et méthode de recherche**

La situation de notre projet de recherche est assez claire, nos besoins d'informations sont précis, le problème est bien défini et les variables sont bien déterminées. Selon nos besoins et la situation de notre projet, nous avons choisi le type de recherche descriptive parmi les trois types de recherche (exploratoire, descriptive et explicative). Avec ce type de recherche, nous pouvons obtenir les informations nécessaires avec une précision déterminée sur un sujet donné. Nous posons une ou plusieurs hypothèses et à la fin de notre recherche nous les confirmons ou les infirmons. La recherche descriptive nous permet de faire des analyses quantitatives sur des échantillons représentatifs de la population étudiée.

Selon nos besoins, nous avons choisi, parmi les méthodes de recherche, la méthode statistique. Elle peut analyser l'ensemble des données numériques et évaluer une ou plusieurs hypothèses. Elle est également capable de tirer les informations nécessaires et les relations existantes dans l'ensemble des données.

## **CHAPITRE 3    PLAN D'EXPÉRIENCE**

### **Introduction**

Lorsque nous rencontrons un problème, une des premières actions à réaliser est l'observation des phénomènes pour obtenir des informations sur ceux-ci. Mais les connaissances obtenues sont très souvent insuffisantes. Alors, il faut se lancer dans une étude des phénomènes c'est-à-dire les expérimenter. Mais, mettre en œuvre une expérience est dispendieuse en temps et en moyens. Dans le but d'en tirer le maximum d'informations, la planification doit être faite soigneusement.

Le plan d'expérience nous permet d'optimiser le temps et le coût des essais qui accompagnent notre recherche. Il nous permet d'obtenir les renseignements nécessaires avec le minimum d'expériences. Il existe différents plans d'expériences adaptées à différentes situations.

Dans ce chapitre, au début nous choisissons la méthode de planification de notre expérience. Puis nous présentons la procédure de détermination des variables dépendantes (les réponses) et des variables indépendantes (les facteurs). Ensuite, nous essayons d'identifier les variables bruits afin de les éliminer, les diminuer ou au moins considérer leurs effets sur les variables dépendantes. La détermination des domaines d'intérêts des variables et des modalités des variables indépendantes, l'identification des interactions entre les variables indépendantes, la modélisation des réponses sont les étapes suivies pour créer un plan d'expérience par la méthode Taguchi.

### **3.1 Méthode de la planification d'expérience**

Dans la dernière section du chapitre précédent, nous avons déterminé la méthode de notre expérience qui est la méthode statistique. En sachant que :

1. parmi les méthodes statistiques de planification de l'expérience, la méthode Taguchi a un très bon potentiel pour optimiser l'expérience, cribler les variables indépendantes afin d'en déterminer les niveaux d'influence de chacune sur les réponses et prédire les comportements du système observé aux conditions souhaitées;
2. parmi les recherches réalisées sur le sujet de la performance de coupe, il y a nombreuses études qui utilisent la méthode Taguchi. Donc, l'utilisation de cette méthode pour les processus de l'usinage a été justifiée.

En considérant les explications ci-dessus, nous choisissons la méthode Taguchi pour la planification de notre expérience.

### 3.2 Obligation et limitation

Avant de commencer la détermination des variables et la planification de notre expérience, il est nécessaire d'identifier les obligations et limitations existantes. Les objectifs initiaux de notre recherche nous obligent à faire les essais dans les conditions non réelles, donc nous sommes obligés de :

1. Faire les essais de surfacage avec un outil qui possède seulement une arête de coupe (ce qui n'est jamais le cas pour le surfacage en industrie). Cette limitation simplifie l'analyse des résultats (absence d'hétérogénéité d'usure ainsi que l'absence des différentes influences des plaquettes sur la surface usinée). La figure 3.1 montre le problème créé quand l'outil possède deux plaquettes. L'usure sur les deux plaquettes est différente. Ce phénomène pour les étudiants complique la partie analyse des données.
2. Faire les essais avec une plaquette de géométrie très simple qui nous donne deux grands avantages. Premièrement, éviter les effets interactionnels inconnus entre le mode d'arrosage et les différents paramètres géométriques de la plaquette. Ces effets interactionnels seraient observés comme des variables bruits et changeront probablement les résultats de l'analyse des données de notre expérience. Deuxièmement, se concentrer uniquement sur les phénomènes primaires liés à la coupe.
3. Faire les essais avec une plaquette sans revêtement. Cela n'est pas utilisé dans l'usinage industriel des pièces en CsMAIP-SiC (dans l'industrie, l'usinage de CsMAIP-SiC est effectué par des plaquettes CBN ou PCD qui ont une durée de vie nettement supérieures à celles utilisées dans nos essais). Ce choix nous permet de diminuer fortement le coût et le temps nécessaire pour réaliser notre expérience, sans négliger le premier objectif fondamental de notre recherche. Il nous permet ainsi de donner aux étudiants du laboratoire "usinage écologique" la possibilité de faire les essais au cours des deux séances de quatre heures, ce qui est acceptable.

4. Le système de micro lubrification est installé sur une machine-outil 5 axes, Huron KX8-Five. Donc, nous sommes contraints de choisir le processus de fraisage pour notre expérience.

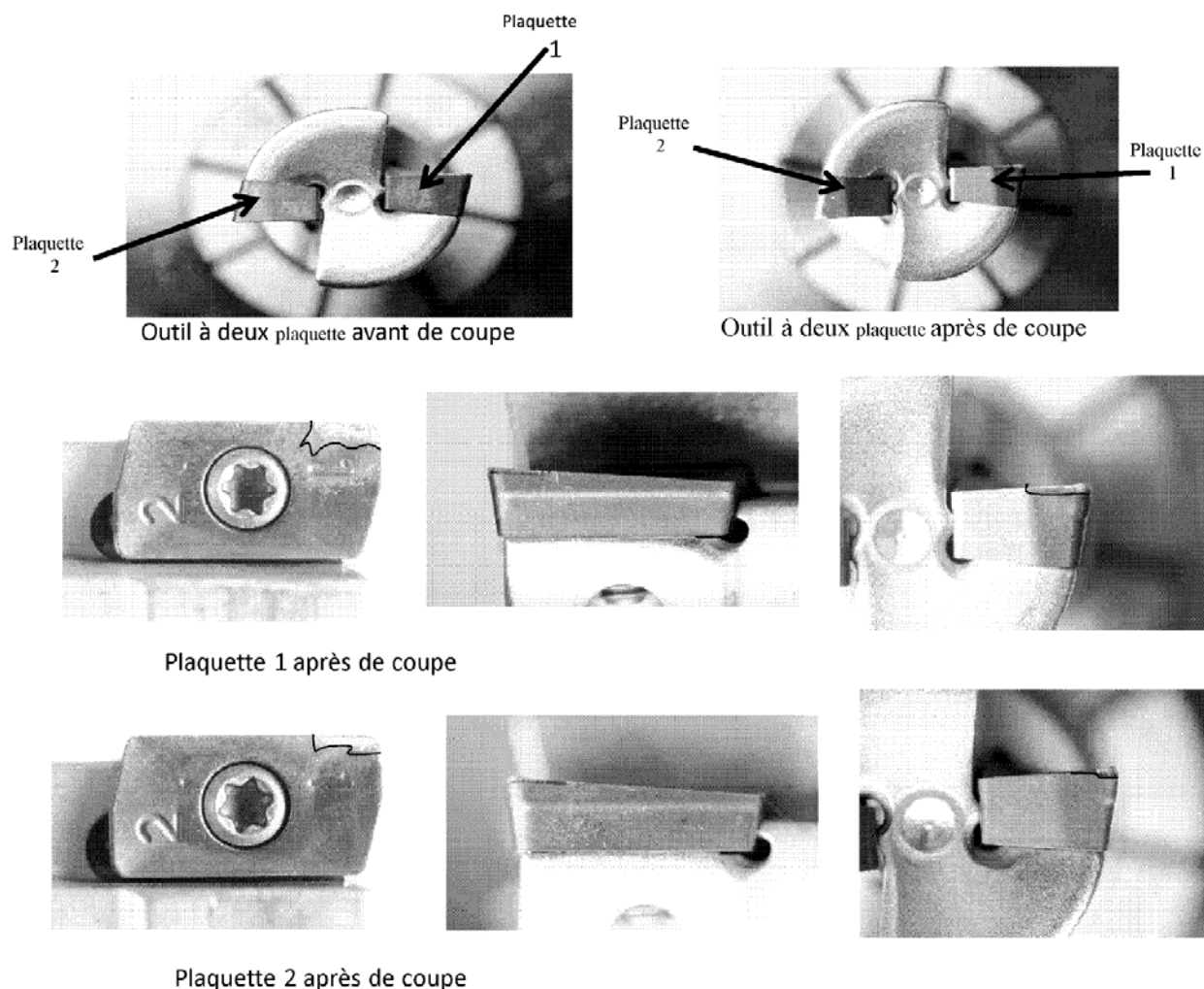


Figure 3.1 : Illustrations des différentes usures sur les deux plaquettes de l'outil.

### 3.3 Variables dépendantes

Les variables dépendantes sont les réponses du système aux différentes conditions expérimentales. Ces variables sont mesurées sur les sujets de l'expérience. Elles peuvent être unidimensionnelles ou multidimensionnelles.

Selon le sujet de notre recherche, les variables dépendantes (VD) sont les critères de la performance de coupe :

1. usure de l'outil (durée de vie de l'outil);
2. intégrité de la surface usinée;
3. efforts de coupe (puissance consommée);
4. formation de copeau (forme du copeau);
5. précision de la pièce usinée.

La considération de tous les critères mentionnés ci-dessus comme les variables dépendantes augmente fortement le temps de réalisation et le coût de notre expérience. Cela est en opposition avec un des objectifs de notre recherche. En effet, nous devons réaliser notre expérience dans des conditions répétitives pour les étudiants. Donc, nous choisissons parmi les critères de coupe, les critères qui sont les plus utilisés en industrie : la durée de vie de l'outil, l'effort de coupe et la rugosité de la surface usinée.

Après détermination des variables dépendantes, il faut définir leurs caractéristiques et leurs valeurs mesurées pour chacune.

### **3.3.1 Durée de vie de l'outil**

La durée de vie de l'outil est un temps déterminé par la limite de l'usure sur la face de dépouille de l'outil. Elle est une variable très importante parce qu'un temps d'utilisation de l'outil supérieur à la durée de vie de l'outil produit une usure très élevée sur une ou plusieurs faces de l'outil. Cela peut affecter fortement les autres variables de l'usinage. Par exemple, une usure élevée sur la face de dépouille de l'outil affecte fortement la rugosité de la surface et la précision dimensionnelle de la pièce usinée. Dans le cas d'une rugosité ou d'une erreur dimensionnelle plus élevée que la valeur prescrite, il faut mettre la pièce au rebut ou refaire le travail qui n'a pas été bien réalisé. Ceci augmente le temps et le coût de production.

Parmi plusieurs définitions existantes pour les phénomènes d'usure, dans le cadre de notre étude, nous utilisons les recommandations de la norme ISO 3685 pour l'usure de l'outil. La figure 3.2 montre les différents phénomènes et leurs définitions. Les paramètres principaux pour l'usure sur la face de dépouille de l'outil sont :

1. largeur moyenne de l'usure en dépouille  $VB_B$ ;
2. largeur maximale de l'usure en dépouille  $VB_{Bmax}$ ;



3. largeur d'usure dans la zone du bec de l'outil;
4. largeur d'usure en entaille.

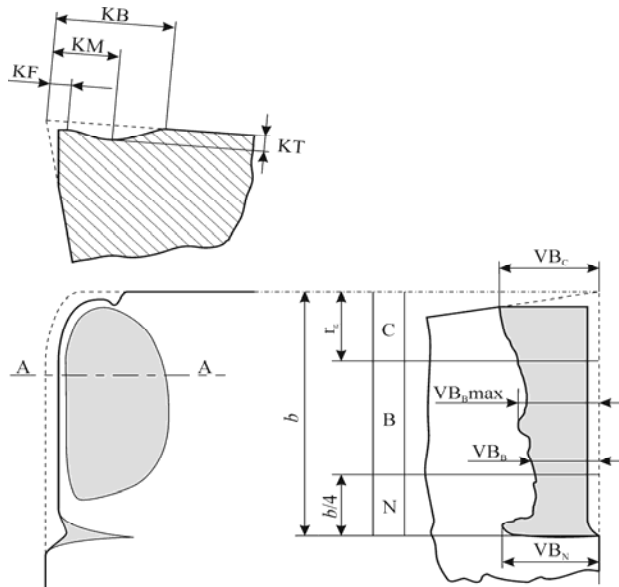


Figure 3.2 : Usure de l'outil et ses phénomènes [19].

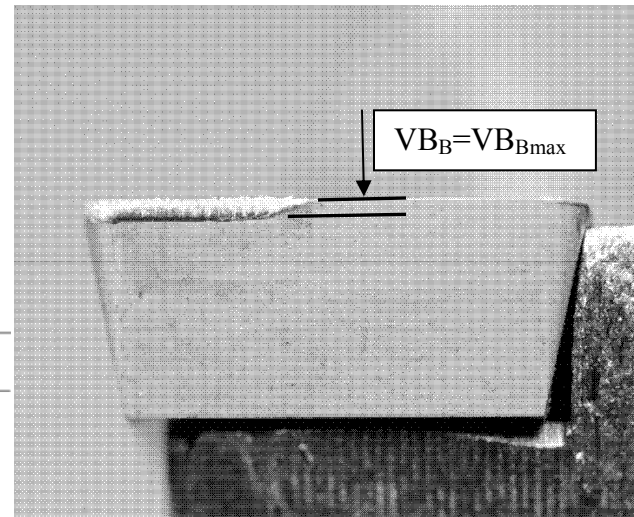


Figure 3.3 : Usure de la face de dépouille.

Les paramètres principaux pour l'usure sur la face de coupe sont :

1. la profondeur du cratère KT;
2. la position du cratère KF;
3. la largeur du cratère KB;
4. la position du centre du cratère KM.

Selon les besoins, un ou plusieurs des paramètres de l'usure, mentionnés ci-dessus, peuvent être utilisés afin de déterminer le critère d'usure et sa valeur limite. Dans notre cas, selon les résultats des essais préliminaires, l'usure sur la face de dépouille de l'outil a été augmentée plus rapidement que l'autre usure. Ce phénomène, en considérant l'importance de cette usure, nous oblige à choisir comme critère de détermination de la durée de vie de l'outil l'usure sur la face de dépouille. Selon la norme ISO 3685, la limite pour  $VB_{Bmax}$  est 0.3 (mm). La figure 3.3 montre le profil de l'usure sur la face de dépouille de l'outil au cours des essais préliminaires. Nous constatons que l'usure est très uniforme. Dans cette situation, la valeur maximale et moyenne de l'usure sur la face de dépouille sont très proches. Donc  $VB_B = VB_{Bmax} = 0.3$  (mm) est notre critère

pour la détermination de la durée de vie de l'outil. Le domaine d'intérêt pour la durée de vie de l'outil est la durée nécessaire pour obtenir une usure  $VB_B=0.3$  (mm).

Pour comparer la durée de vie de l'outil, nous utiliserons la formule de Taylor. Nous comparons les paramètres des formules pour chaque mode de lubrification.

Cela peut nous aider à comprendre leur influence sur l'usure de l'outil de coupe.

$$u=KX^a \quad \text{(Loi de Taylor)} \quad (3.1)$$

où :

-**u** : est le taux d'usure ( $\mu\text{m}/\text{sec}$ )

pour notre cas, nous considérons que **u** est la durée de vie de l'outil;

-**X** : est le paramètre de coupe considéré;

-**K et a** : sont des constantes à déterminer expérimentalement.

Selon les articles étudiés pour un processus de fraisage, il y a plusieurs variables qui influencent la durée de vie de l'outil : vitesse de coupe, mode de lubrification, avance par dent, profondeur de coupe, géométrie de l'outil, matériau de l'outil, matériau usiné, etc.

### 3.3.2 Effort de coupe

L'effort de coupe est la plus grande source de la variation d'énergie consommée au cours de l'usinage. Cela en fait un choix raisonnable comme critère de la performance de coupe. Donc, la connaissance des caractéristiques et des variables qui ont des influences sur l'effort de coupe est essentielle. Pendant l'usinage, l'outil doit enlever le copeau. Au cours de l'enlèvement et des déformations plastiques du copeau, les efforts de coupe affectent fortement l'outil et la pièce usinée. La figure 3.4 présente un schéma des efforts de coupe pendant l'usinage orthogonal.

Le calcul des efforts de coupe pendant l'usinage, spécialement en fraisage, est très difficile. Donc, en pratique, nous allons utiliser une table dynamométrique capable de mesurer directement les efforts dans trois directions X, Y et Z ( $F_x$ ;  $F_y$ ;  $F_z$ ). Pour étudier les processus de fraisage, la pièce étudiée est fixée sur la plaque supérieure du dynamomètre. Les efforts de réaction de l'outil en rotation sont alors mesurés par le dynamomètre via la pièce à usiner. La figure 3.5 montre un schéma des efforts mesurés par dynamomètre. Le système d'acquisition des données pendant

l'usinage de chaque échantillon sera actif et mesurera les forces avec une fréquence de notre choix.

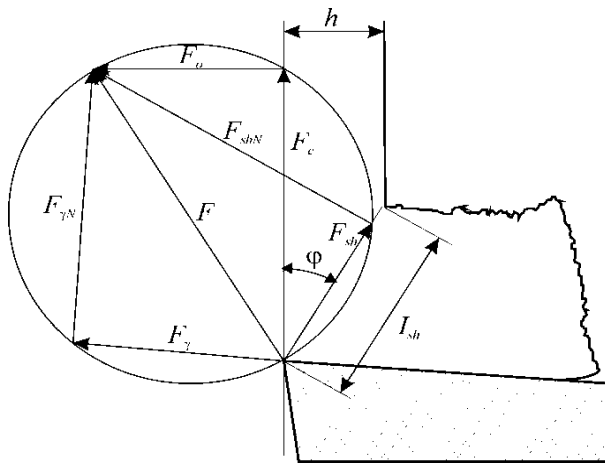


Figure 3.4 : Efforts de coupe [19].

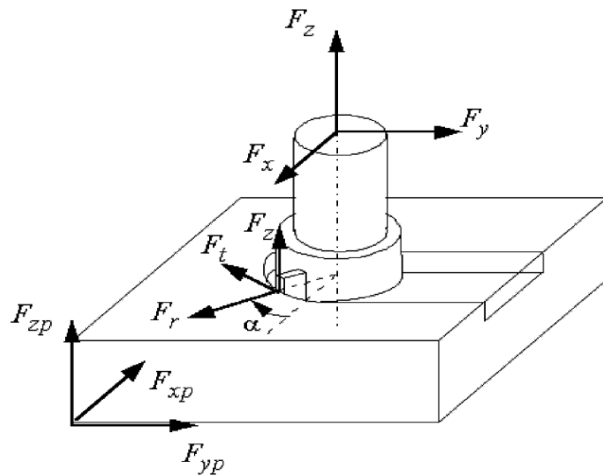


Figure 3.5 : Efforts de coupe au fraisage [164].

Dans le cadre de notre projet, selon nos objectifs, nous avons besoin de connaître l'effort de coupe global qui peut être calculé par formule (3.2) :

$$F_c = (F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)^{1/2} \quad (\text{N}) \quad (3.2)$$

Les efforts maximums admissibles par la machine-outil délimitent le domaine. Les variables qui ont des influences significatives sur les efforts de coupe sont : géométrie de l'outil, matériau de l'outil, matériau usiné, mode de lubrification, conditions de coupe, etc.

### 3.3.3 Rugosité de la surface

Pendant l'usinage, les caractéristiques de la surface de la pièce usinée peuvent être affectées par différentes variables qui sont : vitesse de coupe, avance de coupe, profondeur de coupe, mode de lubrification, géométrie de l'outil, matériau de l'outil, matériau usiné, etc. En général, ces changements et variations sont plus visibles dans la rugosité que dans les autres caractéristiques de la surface usinée. En plus, comme nous avons déjà vu, le changement de rugosité de la surface usinée peut fortement affecter la performance de coupe. C'est pourquoi la majorité des recherches reliées à l'état de la surface usinée et à la performance de coupe ont choisi la rugosité de la surface comme critère principal.

Cependant, compte tenu des explications ci-dessus, nous choisissons la rugosité de la surface usinée comme critère de la performance de coupe. Donc, il est nécessaire de connaître ses caractéristiques.

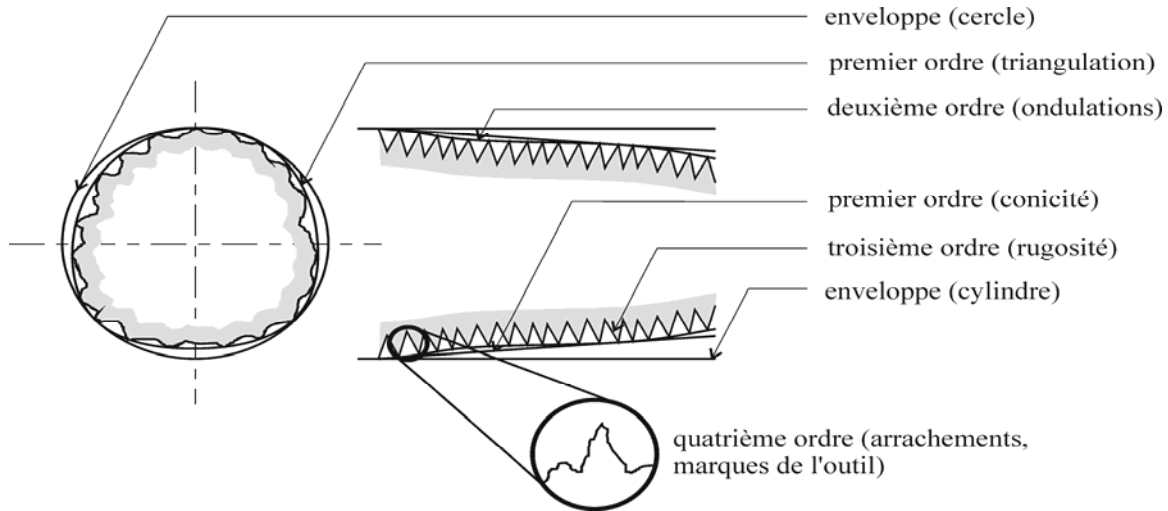


Figure 3.6 : Défauts de la surface usinée [19].

La figure 3.5 montre que sur une surface usinée, il y a différents défauts avec différents ordres de grandeur. Les défauts de 3<sup>e</sup> ordre sont les stries et sillons dus à l'avance de l'arête coupante de l'outil, ou à l'avance par tour de la pièce, ou à des vibrations hautes fréquences. Ces défauts s'appellent rugosité de la surface. En effet, comme nous voyons dans la figure 3.6, la variation de ces défauts est indéterminée. Nous ne pouvons pas les utiliser directement dans notre analyse. Il y a plusieurs paramètres qui ont été définis afin d'encadrer et de présenter une valeur applicable pour la rugosité de la surface. L'écart moyen arithmétique du profil ( $R_a$ ) est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil dans les limites de la longueur déterminée pour mesure. Ceci est la valeur la plus connue et la plus applicable dans le domaine de recherche et dans l'industrie. La figure 3.7 présente un schéma de la rugosité de surface et la formule (3.3) présente la valeur d'écart moyen arithmétique du profil ( $R_a$ ) :

$$R_a = (a + b + c + d + \dots) / n \quad (\mu m) \quad (3.3)$$

où :

- $n$  : est le nombre des points mesurés.

Le domaine d'intérêt de la rugosité de la surface déterminé par les recommandations du concepteur.

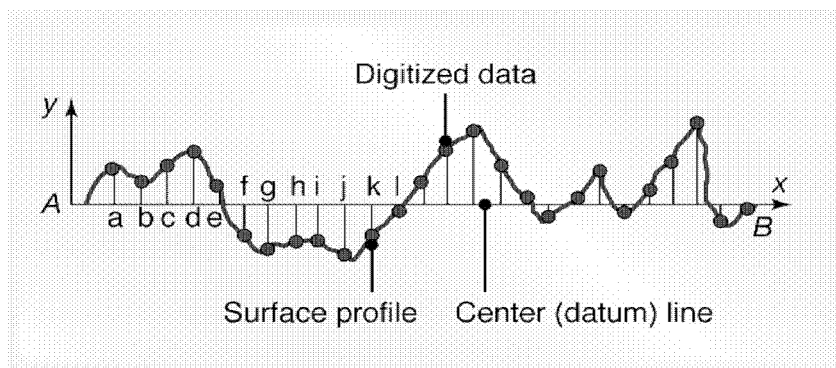


Figure 3.7 : Schéma de la rugosité de la surface [99].

### 3.4 Variables indépendantes

La section précédente présente les variables dépendantes (critères de la performance de coupe) et les variables qui les affectent. Le but de notre recherche est de déterminer l'influence des différents modes de lubrification sur la performance d'usinage du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>. Le mode de lubrification est donc la première variable indépendante. Selon les données collectées au cours de la revue de littérature, nous savons que la vitesse de coupe est une variable très importante qui a une influence sur toutes les variables dépendantes, donc la vitesse de coupe est le deuxième choix.

Les résultats des études récentes sur l'usinage des CsMAlP-SiC montrent que le paramètre profondeur de coupe pendant l'usinage n'a pas un effet important sur la rugosité de la surface. Il augmente seulement la longueur de l'usure de l'outil sur la face de dépouille. Il a été aussi observé qu'il y a une relation presque linéaire entre la profondeur de coupe et les efforts de coupe. En considérant ces données, nous trouvons que la profondeur de coupe n'est pas un bon choix : pendant notre expérience, nous la gardons constante 2 (mm).

L'avance par dent peut affecter les trois variables dépendantes considérées et il faut la définir comme une variable indépendante. Mais il y a un problème, l'effet d'interaction entre l'avance par dent et la vitesse de coupe est très forte (selon les résultats de la majorité des études publiées). Cela diminue fortement la précision d'estimation des valeurs de participation du mode de lubrification aux variabilités des variables dépendantes. Donc, nous ne considérons pas l'avance par dent comme une variable indépendante et nous la fixons à 0.25 (mm/tour).

Certaines autres variables n'ont pas d'influences importantes sur les variables dépendantes ou ont une influence sur une ou deux variables dépendantes. Nous ne considérons pas les autres variables et pendant notre expérience nous les gardons constantes.

Il est important que nous essayons de diminuer le nombre de variables indépendantes afin de donner aux étudiants la chance de bien comprendre et découvrir le phénomène de base du plan d'expérience.

### **3.4.1 Mode de lubrification**

Nous considérons trois modes différents pour le mode de lubrification : usinage à sec, usinage sous arrosage copieux et usinage sous lubrification minimale.

L'usinage à sec est considéré comme un mode de lubrification, mais réellement il faut l'énoncer comme un mode sans lubrification. Les raisons de cette dénomination sont : premièrement, l'usinage à sec, dans la majorité des recherches effectuées dans ce domaine, existe. Les chercheurs utilisent des résultats dans cette condition comme un indice principal qui peut les aider à trouver les relations entre les résultats des différentes études; deuxièmement, pour l'optimisation du processus d'usinage, nous considérons qu'il est possible que l'usinage à sec nous donne la meilleure performance. Donc, il doit être considéré comme un niveau du mode de lubrification.

### **3.4.2 Vitesse de coupe**

Les effets de la vitesse de coupe sur les variables dépendantes de notre expérience ont déjà été présentés dans le premier chapitre. Ainsi, il nous reste la détermination de l'intervalle d'intérêt et le nombre de niveaux considérés pour cette variable.

L'intervalle de vitesse de coupe est déterminé selon les recommandations du manufacturier de la plaquette. Il présente les vitesses économiques de la plaquette pour l'usinage des différents matériaux. Il faut remarquer que ce type de plaquette n'est pas recommandé pour l'usinage des CsMAIP-SiC. Donc, nous nous obligeons à déterminer l'intervalle de la vitesse de coupe selon les données pour les autres matériaux. La vitesse recommandée pour les alliages d'aluminium est de 375 à 750 (m/min) et pour les alliages comme Inconel, Stellite et Hastelloy, elle est de 45 à 55 (m/min).

Donc, nous considérons l'intervalle de la vitesse de coupe de 100 à 200 (m/min).

Selon les données de la revue de littérature, nous savons que : les variations des influences de la vitesse de coupe sur nos variables dépendantes pour l'usinage des CsMAIP-SiC sont considérables quand le changement de la vitesse de coupe est supérieure à 25 (m/min). Donc, si nous divisons l'intervalle de la vitesse de coupe par 25 (m/min), nous obtenons 4 niveaux pour la vitesse de coupe. Premièrement, cela augmente le nombre d'essais de notre expérience à 48; deuxièmement, le plan d'expérience devient non orthogonal. Selon les consignes des méthodes qui planifient les plans d'expériences orthogonaux, pour éviter ce problème, nous devons ajouter un niveau virtuel aux niveaux du mode lubrification. Ce niveau virtuel sera remplacé aléatoirement dans le tableau des essais du plan expérience par un des trois niveaux du mode de lubrification. En effet, le plan ne redevient pas orthogonal, mais l'effet de la non-orthogonalité du plan d'expérience sera minimal.

Pour éviter les problèmes mentionnés en haut, nous considérons une augmentation de 50 (m/min) pour la vitesse de coupe, nous aurons donc 3 niveaux 100, 150, 200 (m/min).

### **3.5 Variables bruits**

Les variables indépendantes non prises en considération dans l'expérience sont appelées variables bruits.

Les variables bruits connues sont celles que l'on peut totalement identifier. On cherche alors à les contrôler pour effacer ou au moins diminuer leurs effets. Les variables parasites non identifiables sont toutes les caractéristiques propres à l'unité statistique. Ces dernières peuvent être contrôlées par randomisation ou par augmentation du nombre d'échantillons.

Les variables bruits qui existent généralement dans le processus d'usinage sont : vibration dans la pièce ou l'outil de coupe, changement de la température d'environnement d'usinage, variation des caractéristiques du matériau usiné, changement des géométries de l'outil de coupe, changement des caractéristiques du fluide de coupe, etc.

En plus, pour notre expérience, il y a des variables bruits spéciales : blocage ou semi-blocage des tuyaux du système de lubrification minimale qui change le débit du fluide de coupe et par conséquent l'influence de lubrification minimale, changement des positionnements des buses, changement de la pression de l'air comprimé, changement dimensionnel de la pièce usinée

(particulièrement l'épaisseur de la pièce), changement des caractéristiques du GrA-Ni 10S.4G® (selon les recherche publiées, premièrement, les caractéristiques de ce matériau changeront faiblement avec le temps; deuxièmement, une grande variation des caractéristiques de différentes séries de production de ce matériau avait été constatée), changement de densité du fluide de coupe, etc.

En considérant toutes les explications ci-dessus concernant les variables bruits, nous faisons l'hypothèse qu'au cours de nos essais, si nous les maîtrisons convenablement, leurs influences ne seront pas importantes.

### 3.6 Interaction des influences des variables indépendantes

Nous savons que pendant l'usinage des métaux, il y a une interaction entre les influences du mode de lubrification et de la vitesse de coupe. L'importance de cette interaction dépend d'un grand nombre de paramètres. Mais comme nous avons vu dans la revue de littérature : il n'y a aucune étude concernant l'influence du mode de lubrification sur la performance de l'usinage du GrA-Ni 10S.4G®. Dans cette situation, nous préférons ne pas considérer l'interaction entre l'influence de la vitesse de coupe et le mode de lubrification. Cette décision nous permet d'avoir le nombre minimum de variables indépendantes (seulement 2 variables). Celui-ci nous donne le nombre minimum d'essais possibles. Nous pouvons déterminer l'existence de l'influence du mode de lubrification sur la performance de coupe au temps et au coût le plus bas possible.

### 3.7 Modélisation des réponses

Selon la méthode choisie et les paramètres déterminés, nous avons considéré une équation linéaire pour toutes les variables indépendantes et chacune des variables dépendantes :

$$AY_1 + BY_2 + I = X \quad (\text{modèle pour chaque variable dépendante}) \quad (3.4)$$

où :

-A, B, I : sont des constantes à déterminer expérimentalement;

-Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, X : sont respectivement les valeurs de la vitesse de coupe, le nombre de niveau du mode de lubrification et la variable dépendante.

Le modèle 3.4 présente 3 coefficients indépendants pour la modélisation des réponses :



$$AY+C=X \quad (3.5)$$

où :

-A, C : sont des constantes à déterminer expérimentalement;

-Y, X : sont respectivement les valeurs de la vitesse de coupe et la variable dépendante pour un mode de lubrification déterminé.

Il y a donc trois équations pour chaque variable dépendante correspondant à chacun des modes de lubrification.

### 3.8 Tableau des essais d'expérience

La détermination du tableau Taguchi nécessite de connaître le nombre nécessaire d'essais. Celui-ci est égal au nombre total de degré de liberté de l'expérience plus 1. Le nombre total de degré de liberté de l'expérience est égal au total de nombre de degré de liberté des variables indépendantes. Pour déterminer le nombre de degré de liberté de chaque variable indépendante, il suffit de soustraire 1 au nombre de niveaux de cette variable. Donc, nous avons :

Nombre d'essais nécessaires pour le plan d'expérience =  $[(3-1) + (3-1)] + 1 = 5$

Le nombre d'essais du tableau de Taguchi choisi doit être au moins de 5. Le tableau 3.1 nous aide à trouver le tableau Taguchi approprié.

Tableau 3.1 : Déterminateur de tableau Taguchi [163]

		Nombre de variables indépendantes																		
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Nombre des niveaux des VD	2	L <sub>4</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>8</sub>	L <sub>8</sub>	L <sub>8</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>12</sub>	L <sub>16</sub>	L <sub>16</sub>	L <sub>16</sub>	L <sub>16</sub>	L <sub>32</sub>	L <sub>32</sub>	L <sub>32</sub>	L <sub>32</sub>	L <sub>32</sub>
	3	L <sub>9</sub>	L <sub>9</sub>	L <sub>9</sub>	L <sub>18</sub>	L <sub>18</sub>	L <sub>18</sub>	L <sub>18</sub>	L <sub>27</sub>	L <sub>27</sub>	L <sub>27</sub>	L <sub>27</sub>	L <sub>27</sub>	L <sub>36</sub>	L <sub>36</sub>	L <sub>36</sub>	L <sub>36</sub>	L <sub>36</sub>	L <sub>36</sub>	L <sub>36</sub>
	4	L <sub>16</sub>	L <sub>16</sub>	L <sub>16</sub>	L <sub>16</sub>	L <sub>32</sub>	L <sub>32</sub>	L <sub>32</sub>	L <sub>32</sub>	L <sub>32</sub>										
	5	L <sub>25</sub>	L <sub>25</sub>	L <sub>25</sub>	L <sub>25</sub>	L <sub>25</sub>	L <sub>50</sub>	L <sub>50</sub>	L <sub>50</sub>	L <sub>50</sub>	L <sub>50</sub>	L <sub>50</sub>								

Chaque tableau orthogonal de Taguchi peut être exprimé comme " $L_X(A^B)$ " où "x" présente le nombre des essais, "B" le nombre de variables indépendantes et "A" le nombre de niveaux des

variables indépendantes. Pour nos essais, le tableau choisi est  $L_9(3^4)$ . Le tableau de notre expérience est le tableau 3.2.

En considérant que nous utilisons un tableau standard de Taguchi, il n'y a pas besoin de vérifier l'orthogonalité de ce tableau parce que tous les tableaux de Taguchi sont orthogonaux.

Tableau 3.2 : Tableau standard de Taguchi pour l'expérience

Numéro des essais	Variables indépendantes	
	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)
1	Sec	100
2	Sec	150
3	Sec	200
4	AC*	100
5	AC	150
6	AC	200
7	LM	100
8	LM**	150
9	LM	200

\* Arrosage copieux

\*\* Lubrification minimale

## **CHAPITRE 4 PRÉPARATION DE L'EXPÉRIENCE**

### **Introduction**

Dans ce chapitre, nous exposons la préparation des essais de l'expérience en déterminant la ou les tâches qui devront être réalisées pendant l'expérience. La préparation d'une expérience consiste essentiellement à :

1. définir le processus et les conditions de coupe;
2. définir les équipements, les instruments et les matériaux nécessaires pour réaliser les essais du plan d'expérience, pour collecter et analyser les données;
3. déterminer le nombre de répétitions nécessaires pour avoir le niveau de confiance requis;
4. déterminer l'ordonnancement des essais du plan d'expérience afin d'en minimiser le coût et le temps de réalisation.

Il faut noter que seulement les parties essentielles et nécessaires des informations des équipements, des instruments et des matériaux de notre expérience sont présentées dans ce chapitre. Pour plus d'information, il faut consulter le mode d'emploi ou le manuel de l'utilisateur de l'équipement.

### **4.1 Processus et conditions de coupe**

Le processus choisi est le fraisage en concordance (nous avons déjà expliqué la raison de notre choix).

Le fraisage est, dans son principe, un procédé de coupe (enlèvement de matière) faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à une ou plusieurs arêtes (mouvement de coupe) et l'avance rectiligne d'une pièce (dit mouvement d'avance).

Dans le cas du fraisage en concordance, la direction d'avance est la même que le sens de rotation de la fraise. La profondeur de coupe va donc diminuer jusqu'à être égale à zéro en fin de passe.

Les variables dépendantes qui doivent être mesurées au cours du processus de fraisage sont :

1. la durée de vie de l'outil;
2. l'effort de coupe;
3. la rugosité de la surface.

Les variables indépendantes représentent les causes des variations des variables dépendantes. Au cours de l'usinage, nous manipulons les variables dépendantes pour mettre en évidence leurs effets. Les variables indépendantes choisies sont :

- 1- le mode de lubrification;
- 2- la vitesse de coupe.

Nous réalisons notre expérience en distinguant trois niveaux différents pour chaque variable indépendante. Le mode arrosage peut être : sec; arrosage copieux; lubrification minimale. La vitesse de coupe peut être : 100 (m/min) ; 150 (m/min); 200 (m/min).

Le débit du fluide de coupe pour arrosage copieux est d'environ 600 (L/h) et le débit pour la lubrification minimale est de 3.64 (L/h). Le fluide de coupe utilisé pour les deux modes de lubrification (copieux et minimale) est le CIMSTAR 60C-HFP.

L'arrosage copieux est réalisé par le système de lubrification de la machine-outil et la lubrification minimale est produite par un système de micro-lubrification Technolobe.

Les conditions de coupe sont :

- 1- profondeur de coupe : 2 mm;
- 2- avance par dent : 0.25 mm/dent ;
- 3- immersion : 12 mm.

Toutes les autres variables d'usinage sont constantes.

## 4.2 Matériau usiné

Le composite GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> étudié est un CsMAIPA qui contient deux particules : (1) le SiC d'une taille de l'ordre de 14  $\mu\text{m}$ ; (2) le graphite d'une taille de l'ordre de 80  $\mu\text{m}$  revêtu par une couche de nickel d'épaisseur 5-10  $\mu\text{m}$  (50 % massique de Nickel et Graphite).

Les dimensions des pièces sont 215×105×20 (mm). L'usinage est effectué sur la plus grande surface de la pièce.

Avant l'utilisation de chaque pièce, nous surfignons la face où nous souhaitons réaliser l'essai.

### **4.3 Équipement et instrument**

Machine-outil de 5 axes, Huron KX8-Five :

L'étude a été effectuée sur un centre d'usinage horizontal à commande numérique 5 axes d'une puissance maximale de 25 kW pouvant atteindre une vitesse de rotation de 24000 tr/min et une avance de 4 m/min.

Outil de coupe : S VMSP 073AR 90CCEC :

L'outil choisi est une fraise combinée de diamètre 18.542 mm qui possède seulement une plaquette.

Insert de type SD322D :

La géométrie de la plaquette est volontairement très simple pour pouvoir se concentrer uniquement sur les phénomènes primaires liés à la coupe.

Rugosimètre SV-C4000 (Mitutoyo).

Table dynamométrique kistler type 9255B.

Système de mesure des efforts de coupe :

Système d'acquisition des données (National Instruments NI PXI-1042) et amplificateur de charge multicanaux.

Caméra Digital Rebel pour la prise de photos de l'usure de l'outil.

### **4.4 Nombre de répétitions**

Quand la variabilité naturelle n'est pas négligeable, quand la détection des facteurs réellement influents est difficile, ou lorsque l'incertitude est trop importante pour estimer les différents effets, il faut réaliser des répétitions pour trouver des réponses acceptables et augmenter la précision des résultats [161].

Malgré le travail conséquent sur la détermination du nombre de répétitions nécessaires, il n'y a pas de réponse unique et certaine que nous pouvons utiliser pour tous les cas.

Notre plan d'expérience est un plan factoriel orthogonal et pendant l'étude préliminaire, nous avons trouvé les variances des variabilités naturelles des variables dépendantes. Nous pouvons utiliser la formule suivante pour trouver le nombre de répétitions :

$$IC = t_{1-\alpha/2} \times \sigma(e) \sqrt{\frac{P}{rq}} \quad (4.1)$$

où :

- P** : est le nombre de coefficients indépendants du modèle prévu pour VD;
- **$\sigma$**  : est l'écart-type de la variabilité naturelle de la réponse;
- q** : est le nombre de combinaisons du plan d'expérience;
- r** : est le nombre de répétitions;
- t** : est le fractile d'ordre  $1-\alpha/2$  de la loi de student;
- IC** : est la demi-largeur pour un niveau de confiance déjà fixé pour les résultats de l'expérience.

Pour notre plan d'expérience, nous avons selon étude préliminaire :

$$t=3.4 \quad q=9 \quad p=3 \quad \sigma_t=0.183, \quad \sigma_f=9.72 \quad \sigma_r=0.2245$$

Les valeurs IC pour toutes les variables ont été considérées égales à 5 % de la valeur moyenne pendant les essais préliminaires.

$$m_t=1.89, \quad m_f=9.72 \quad m_r=0.2245$$

Selon les données présentées, le nombre de répétitions nécessaire est égal à 3.

## 4.5 Ordonnancement des essais

Le plan d'essais et le nombre de répétition ont été déterminés, mais la réalisation des essais nécessite leur ordonnancement pour en diminuer le temps et le coût. Pour notre expérience, nous savons qu'après chaque utilisation du système de micro-lubrification, tous leurs tuyaux doivent être vidés et nettoyés. Cela coûte cher et prend du temps. La table dynamométrique doit

également être nettoyée après utilisation d'un fluide de coupe. Notre plan ordonnance donc les usinages de la manière suivante : tous les essais d'usinage à sec sont réalisés, ensuite les essais sous LM sont faits, puis les essais sous arrosage copieux sont déroulés.

## **CHAPITRE 5     ANALYSE DE DONNÉES ET DISCUSSION**

### **Introduction**

Les résultats d'une recherche apportent des informations supplémentaires nécessaires pour la prise de décision. Ces résultats dépendent fortement de la façon d'analyser les données. Il faut donc choisir une méthode d'analyse qui correspond à la question de recherche. Il est à noter qu'effectuer différents types d'analyses statistiques ne produit qu'une complexité plus élevée pour l'interprétation des résultats. Notre plan d'expérience a été formé par la méthode Taguchi, c'est donc un plan d'expérience orthogonal et une méthode d'analyse lui a été assignée.

Dans ce chapitre, nous analysons les données déjà préparées (chapitre précédent) selon la méthode Taguchi afin de :

1. déterminer les variables indépendantes qui ont des effets significatifs sur la moyenne des variables dépendantes;
2. définir les effets des variables indépendantes sur les variables dépendantes et comparer le pourcentage de contribution de chaque variable indépendante à la variabilité d'une variable dépendante;
3. trouver les formules statistiques qui prédisent la valeur d'une variable dépendante par rapport aux combinaisons des variables indépendantes;
4. déterminer les interactions entre les facteurs et évaluer leurs influences sur une variable dépendante;
5. spécifier les pourcentages d'erreur des valeurs calculées des variables dépendantes par rapport aux valeurs expérimentales.

La dernière section de ce chapitre présente : a) la visualisation de l'influence des variables indépendantes sur les critères de la performance de coupe; b) l'identification des effets visibles des variables indépendantes sur les critères (variables dépendantes) de la performance de coupe; c) la définition des principales raisons d'existence de chaque effet visible; d) les déterminations des solutions possibles pour éliminer ou diminuer un effet négatif ou maximiser un effet positif.



## 5.1 Données

Les données collectées ont été préparées dans le chapitre précédent, elles sont représentées dans les tableaux 5.1, 5.2, 5.3.

Tableau 5.1 : Données pour la durée de vie de l'outil

Numéro d'essais	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Durée de vie de l'outil (min)		
			T	T	T
1	Sec	100	1.91	1.9	1.9
2	Sec	150	1.77	1.78	1.59
3	Sec	200	1.55	1.52	1.58
4	AC*	100	2.14	2.13	2.21
5	AC	150	1.85	1.93	1.96
6	AC	200	1.86	1.73	1.7
7	LM	100	2.12	2.13	2.11
8	LM**	150	1.95	2.11	2.09
9	LM	200	1.86	1.76	1.83

\* Arrosage copieux

\*\* Lubrification minimale

Tableau 5.2 : Données pour l'effort de coupe

Numéro d'essais	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Effort de coupe (N)		
			Fc	Fc	Fc
1	Sec	100	106.62	112.35	100.18
2	Sec	150	100.59	93.37	106.62
3	Sec	200	89.76	90.35	90.44
4	AC	100	120.53	119.57	121.25
5	AC	150	109.86	108.27	109.53
6	AC	200	101.58	103.36	99.67
7	LM	100	116.43	118.45	119.38
8	LM	150	118.28	116.99	114.24
9	LM	200	104.78	105.93	108.56

Tableau 5.3 : Données pour la rugosité de la surface usinée

Numéro d'essais	Mode de lubrification	Vitesse de coupe (m/min)	Rugosité de la surface ( $\mu\text{m}$ )		
			Ra	Ra	Ra
1	Sec	100	1.28	1.50	1.11
2	Sec	150	1	0.94	1.02
3	Sec	200	0.92	0.9	0.9
4	AC	100	0.89	0.89	0.87
5	AC	150	0.76	0.75	0.77
6	AC	200	0.6	0.69	0.5
7	LM	100	0.81	0.8	0.81
8	LM	150	0.6	0.6	0.6
9	LM	200	0.65	0.59	0.67

## 5.2 Analyse de données

La méthode d'analyse de données est la méthode Taguchi et les étapes de suivie sont présentées au tableau 5.4.

Tableau 5.4 : Définition des éléments et de leurs formules

Définition	Formule
Nombre de niveau de la variable indépendante	$m_F$
Nombre de degré de liberté de la variable indépendante	$N_F = m_F - 1$
Nombre de degré de liberté de la variable interaction entre deux variables indépendantes (i,j)	$n_{A_i A_j} = n_{A_i} \times n_{A_j}$
Nombre total de degré de liberté de toutes les variables indépendantes (p= nombre des VI)	$n_T = \sum_{i=1}^p n_{A_i} + \sum_{i=1}^p \left( \sum_{j=1}^p n_{A_i A_j} \right)$
Nombre d'essais nécessaires pour le plan d'expérience	$N = n_T + 1$
Nombre de combinaisons du plan d'expérience	$N_p$
Nombre de degré de liberté pour toutes les variables indépendantes	$n_V = N_p \times \text{nombre de répétitions} - 1$
Nombre de degré de liberté pour toutes les variables résiduelles	$n_e = n_V - n_T$
La somme des données pour chaque variable dépendante ( $y_i$ = valeur pour chaque variable dépendante)	$T_{VD} = \sum y_i$
La somme des données pour chaque variable dépendante	$\bar{Y}_{VD} = \frac{T_{VD}}{N_{(\text{nombre total des données})}}$
La somme des données pour chaque niveau des VI pour chaque variable dépendante	$T_{VD, \text{Facteur, Niveau}} = \sum (y_i)_{\text{Facteur, Niveau}}$
La somme des carrés pour la variation totale	$SC_{TVD} = \sum (y_i - \bar{Y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{T_{VD}^2}{N_{(\text{nombre total de données})}}$

Tableau 5.4 : Définition des éléments et de leurs formules

Définition	Formule
La somme des carrés pour chaque facteur	$SC_{VD, \text{Facteur}} = \sum \frac{(T_{VD, \text{Facteur, Niveau}})^2}{n_{(\text{nombre de données correspondant au niveau du facteur})}} - \sum \frac{(T_{VD})^2}{N_{(\text{nombre total de données})}}$
La somme des carrés pour la variation résiduelle	$SC_{eAD} = SC_{TVD} - \sum SC_{VD, \text{Facteur}}$
Les variances (ou carrés moyens) associées à chaque facteur	$V_{VD, \text{Facteur}} = \frac{SC_{VD, \text{Facteur}}}{n_F}$
La variance (ou carrés moyens) associée à la variance résiduelle	$V_{eVD} = \frac{SC_{eVD}}{n_e}$
“ F ” Calculée	$f_{VD, \text{Facteur}} = \frac{V_{VD, \text{Facteur}}}{V_{eVD}}$
“ F ” viens du tableau de Fisher-Snedecor	$F_{\alpha, n_F, n_e} \text{ (Fisher-Snedecor)}$
<p>Si <math>f_{VD, \text{Facteur}} &lt; F_{\alpha, n_F, n_e} \text{ (Fisher-Snedecor)}</math> ; le facteur n'a pas une influence significative sur VD.</p> <p>Si <math>f_{VD, \text{Facteur}} \geq F_{\alpha, n_F, n_e} \text{ (Fisher-Snedecor)}</math> ; le facteur a une influence significative sur VD.</p>	
La somme des carrés absolue de chaque facteur	$SC'_{VD, \text{Facteur}} = SC_{VD, \text{Facteur}} - (n_f) \times V_{eVD}$
La contribution de chaque facteur à la variabilité de la VD	$\rho_{VD, \text{Facteur}} \% = \frac{SC'_{VD, \text{Facteur}}}{SC_{TVD}} \times 100$
La somme des carrés absolue des variables résiduelles	$SC'_{eVD} = SC_{eVD} + \sum (n_f) \times V_{eVD}$

Pour analyser les données de l'expérience, nous avons créé un programme qui utilise les formules présentées au tableau 5.4. Le programme et les résultats d'analyse des données sont présentés ci-dessous :

```
disp('*****')
```

```
%Analyse des données
```

```
clear
```

```
clc
```

```
T= [1.905   1.8985  1.9005
     1.7742  1.7832  1.5852
     1.5508  1.5238  1.5804
     2.136   2.1336  2.21
     1.8524  1.9287  1.9561
     1.8627  1.7259  1.6995
     2.1195  2.1283  2.1107
     1.9525  2.1116  2.0934
     1.8555  1.7566  1.8344];
```

```
Ra= [ 0.92130.8959  0.8989
      0.9961  0.9399  1.0235
      1.2817  1.5011  1.1127
      0.5977  0.6889  0.4999
      0.7555  0.7535  0.7659
      0.8889  0.8897  0.8734
      0.6453  0.5937  0.6678
      0.604   0.6009  0.5999
      0.807   0.7995  0.8097];
```

```
Fc= [ 106.62   112.3505   100.1752
      100.5889  93.3694   106.6234
      89.757    90.3466   90.4367
      120.5287  119.5746  121.25
```

```

109.8627  108.2657  109.5264
101.578   103.3642  99.6735
116.4267  118.4536  119.3756
118.2784  116.9864  114.2367
104.7789  105.9264  108.5571];

disp('*****')
AT=sum(T);
FFc=sum(Fc);
RRa=sum(Ra);
TT=sum(AT)
YT=TT/27
TFc=sum(FFc)
YFc=TFc/27
TRa=sum(RRa)
YRa=TRa/27
disp('*****')
% Le calcul des sommes de chaque niveau de chaque VI de la durée vie de l'outil.
TTML1=sum(T(1,1:3))+sum(T(2,1:3))+sum(T(3,1:3))
TTML2=sum(T(4,1:3))+sum(T(5,1:3))+sum(T(6,1:3))
TTML3=sum(T(7,1:3))+sum(T(8,1:3))+sum(T(9,1:3))
TTVc1=sum(T(1,1:3))+sum(T(4,1:3))+sum(T(7,1:3))
TTVc2=sum(T(2,1:3))+sum(T(5,1:3))+sum(T(8,1:3))
TTVc3=sum(T(3,1:3))+sum(T(6,1:3))+sum(T(9,1:3))
% Le calcul de la moyenne de la durée de vie de l'outil.
YTML1=TTML1/9
YTML2=TTML2/9
YTML3=TTML3/9
YTVc1=TTVc1/9
YTVc2=TTVc2/9
YTVc3=TTVc3/9
% Le calcul de l'effet différentiel de la durée de vie de l'outil.

```

```

EdTML1=YTML1-YT
EdTML2=YTML2-YT
EdTML3=YTML3-YT
EdTVc1=YTVc1-YT
EdTVc2=YTVc2-YT
EdTVc3=YTVc3-YT
% L'estimation des valeurs moyennes sorties de la durée de vie de l'outil (min).
t(1)=YT+EdTML1+EdTVc1;
t(2)=YT+EdTML1+EdTVc2;
t(3)=YT+EdTML1+EdTVc3;
t(4)=YT+EdTML2+EdTVc1;
t(5)=YT+EdTML2+EdTVc2;
t(6)=YT+EdTML2+EdTVc3;
t(7)=YT+EdTML3+EdTVc1;
t(8)=YT+EdTML3+EdTVc2;
t(9)=YT+EdTML3+EdTVc3;
disp('*****')
%Le calcul des sommes de chaque niveau de chaque VI de l'effort de coupe.
TFcML1=sum(Fc(1,1:3))+sum(Fc(2,1:3))+sum(Fc(3,1:3))
TFcML2=sum(Fc(4,1:3))+sum(Fc(5,1:3))+sum(Fc(6,1:3))
TFcML3=sum(Fc(7,1:3))+sum(Fc(8,1:3))+sum(Fc(9,1:3))
TFcVc1=sum(Fc(1,1:3))+sum(Fc(4,1:3))+sum(Fc(7,1:3))
TFcVc2=sum(Fc(2,1:3))+sum(Fc(5,1:3))+sum(Fc(8,1:3))
TFcVc3=sum(Fc(3,1:3))+sum(Fc(6,1:3))+sum(Fc(9,1:3))
% Le calcul de la moyenne de l'effort de coupe.
YFcML1=TFcML1/9
YFcML2=TFcML2/9
YFcML3=TFcML3/9
YFcVc1=TFcVc1/9
YFcVc2=TFcVc2/9
YFcVc3=TFcVc3/9

```

% Le calcul de l'effet différentiel de l'effort coupe.

$$EdFcML1=YFcML1-YFc$$

$$EdFcML2=YFcML2-YFc$$

$$EdFcML3=YFcML3-YFc$$

$$EdFcVc1=YFcVc1-YFc$$

$$EdFcVc2=YFcVc2-YFc$$

$$EdFcVc3=YFcVc3-YFc$$

% L'estimation des valeurs moyennes sorties de l'effort de coupe (N).

$$f(1)=YFc+EdFcML1+EdFcVc1;$$

$$f(2)=YFc+EdFcML1+EdFcVc2;$$

$$f(3)=YFc+EdFcML1+EdFcVc3;$$

$$f(4)=YFc+EdFcML2+EdFcVc1;$$

$$f(5)=YFc+EdFcML2+EdFcVc2;$$

$$f(6)=YFc+EdFcML2+EdFcVc3;$$

$$f(7)=YFc+EdFcML3+EdFcVc1;$$

$$f(8)=YFc+EdFcML3+EdFcVc2;$$

$$f(9)=YFc+EdFcML3+EdFcVc3;$$

disp('\*\*\*\*\*')

%Le calcul des sommes de chaque niveau de chaque VI de la rugosité de la surface.

$$TRaML1=sum(Ra(1,1:3))+sum(Ra(2,1:3))+sum(Ra(3,1:3))$$

$$TRaML2=sum(Ra(4,1:3))+sum(Ra(5,1:3))+sum(Ra(6,1:3))$$

$$TRaML3=sum(Ra(7,1:3))+sum(Ra(8,1:3))+sum(Ra(9,1:3))$$

$$TRaVc1=sum(Ra(1,1:3))+sum(Ra(4,1:3))+sum(Ra(7,1:3))$$

$$TRaVc2=sum(Ra(2,1:3))+sum(Ra(5,1:3))+sum(Ra(8,1:3))$$

$$TRaVc3=sum(Ra(3,1:3))+sum(Ra(6,1:3))+sum(Ra(9,1:3))$$

% Le calcul de la moyenne de la rugosité de la surface.

$$YRaML1=TRaML1/9$$

$$YRaML2=TRaML2/9$$

$$YRaML3=TRaML3/9$$

$$YRaVc1=TRaVc1/9$$

$$YRaVc2=TRaVc2/9$$

$$YRaVc3=TRaVc3/9$$

% Le calcul de l'effet différentiel de la rugosité de la surface.

$$EdRaML1=YRaML1-YRa$$

$$EdRaML2=YRaML2-YRa$$

$$EdRaML3=YRaML3-YRa$$

$$EdRaVc1=YRaVc1-YRa$$

$$EdRaVc2=YRaVc2-YRa$$

$$EdRaVc3=YRaVc3-YRa$$

% Le calcul de l'estimation des valeurs moyennes sorties de la rugosité de la surface.

% la surface microm

$$r(1)=YRa+EdRaML1+EdRaVc1;$$

$$r(2)=YRa+EdRaML1+EdRaVc2;$$

$$r(3)=YRa+EdRaML1+EdRaVc3;$$

$$r(4)=YRa+EdRaML2+EdRaVc1;$$

$$r(5)=YRa+EdRaML2+EdRaVc2;$$

$$r(6)=YRa+EdRaML2+EdRaVc3;$$

$$r(7)=YRa+EdRaML3+EdRaVc1;$$

$$r(8)=YRa+EdRaML3+EdRaVc2;$$

$$r(9)=YRa+EdRaML3+EdRaVc3;$$

$$Tyi2=0;$$

$$Fcyi2=0;$$

$$Rayi2=0;$$

for i=1:9

for j=1:3

$$Tyi2=Tyi2+T(i,j)^2;$$

$$Fcyi2=Fcyi2+Fc(i,j)^2;$$

$$Rayi2=Rayi2+Ra(i,j)^2;$$

end

end

disp('\*\*\*\*\*')

% Le calcul de la somme des carrés de toutes les variables indépendantes.



```

Tyi2
Fcyi2
Rayi2
SCTT=Tyi2-TT^2/27
SCTFc=Fcyi2-TFc^2/27
SCTRa=Rayi2-TRa^2/27
disp('*****')
% Le calcul de la somme des carrés de toutes les variables dépendantes de la durée de vie de
l'outil.
SCTML=(TTML1^2+TTML2^2+TTML3^2)/9-TT^2/27
SCTVc=(TTVc1^2+TTVc2^2+TTVc3^2)/9-TT^2/27
disp('*****')
% Le calcul de la somme des carrés de toutes les variables dépendante de l'effort de coupe.
SCFcML=(TFcML1^2+TFcML2^2+TFcML3^2)/9-TFc^2/27
SCFcVc=(TFcVc1^2+TFcVc2^2+TFcVc3^2)/9-TFc^2/27
disp('*****')
%Le calcul de la somme des carrés totale des variables dépendante de la rugosité de la surface.
SCRaML=(TRaML1^2+TRaML2^2+TRaML3^2)/9-TRa^2/27
SCRaVc=(TRaVc1^2+TRaVc2^2+TRaVc3^2)/9-TRa^2/27
disp('*****')
% Le calcul de la variation des variables résiduelles
SCeT=SCTT-(SCTML+SCTVc)
SCeFc=SCTFc-(SCFcML+SCFcVc)
SCeRa=SCTRa-(SCRaML+SCRaVc)
disp('*****')
% Le calcul de la variation de chaque facteur de T
VTML=SCTML/2
VTVc=SCTVc/2
VeT=SCeT/22
disp('*****')
% Le calcul de la variation de chaque facteur de Fc

```

```

VFcML=SCFcML/2
VFcVc=SCFcVc/2
VeFc=SCeFc/22
disp('*****')
% Le calcul de la variation de chaque facteur de Ra
VRaML=SCRaML/2
VRaVc=SCRaVc/2
VeRa=SCeRa/22
disp('***** Le nombre de Fisher-Snedecor pour chaque facteur *****')
%Le nombre de Fisher-Snedecor pour chaque facteur de T
fTML=VTML/VeT;
fTVc=VTVc/VeT;
{'fTML','fTVc',:[fTML],[fTVc]}
disp('*****')
%Le nombre de Fisher-Snedecor pour chaque facteur de Fc
fFcML=VFcML/VeFc;
fFcVc=VFcVc/VeFc;
{'fFcML','fFcVc',:[fFcML],[fFcVc]}
disp('*****')
%Le nombre de Fisher-Snedecor pour chaque facteur de Ra
fRaML=VRaML/VeRa;
fRaVc=VRaVc/VeRa;
{'fRaML','fRaVc',:[fRaML],[fRaVc]}
disp('*****')
% La somme des carrés absolus de chaque facteur de T
SCPTML=SCTML-2*VeT
SCPTVc=SCTVc-2*VeT
SCPeT=SCeT+4*VeT
disp('*****')
% La somme carrée absolus de chaque facteur de Fc
SCPFcML=SCFcML-2*VeFc

```

```

SCPFcVc=SCFcVc-2*VeFc
SCPeFc=SCeFc+4*VeFc
disp('*****')
% La somme carrée absolue de chaque facteur de Ra
SCPRaML=SCRaML-2*VeRa
SCPRaVc=SCRaVc-2*VeRa
SCPeRa=SCeRa+4*VeRa
disp('*****   La pourcentage de contribution de chaque facteur à la variation de   *****')
%Le pourcentage de contribution de chaque facteur à la variation de T
RoTML=SCPTML/SCTT*100;
RoTVc=SCPTVc/SCTT*100;
RoeT=SCPeT/SCTT*100;
{'RoTML','RoTVc','RoeT';[RoTML],[RoTVc],[RoeT]}
disp('*****')
%Le pourcentage de contribution de chaque facteur à la variation de Fc
RoFcML=SCPFcML/SCTFc*100;
RoFcVc=SCPFcVc/SCTFc*100;
RoeFc=SCPeFc/SCTFc*100;
{'RoFcML','RoFcVc','RoeFc';[RoFcML],[RoFcVc],[RoeFc]}
disp('*****')
%Le pourcentage de contribution de chaque facteur à la variation de Ra
RoRaML=SCPRaML/SCTRa*100;
RoRaVc=SCPRaVc/SCTRa*100;
RoeRa=SCPeRa/SCTRa*100;
{'RoRaML','RoRaVc','RoeRa';[RoRaML],[RoRaVc],[RoeRa]}
disp('*****')
disp('*****')

```

Dans le chapitre précédent, nous avons trouvé les nombres de degré de liberté pour les variables indépendantes et les variables résiduelles qui sont : 2 pour toutes les variables indépendantes et

22 pour les variables résiduelles. Le nombre Fisher-Snedecor est trouvé par consultation du tableau standard et est égal à 3.44.

Le tableau 5.5 montre l'analyse des variances pour les variables dépendantes et la comparaison entre les nombre calculés de Fisher-Snedecor et les nombre standard de Fisher-Snedecor. Au cas où le nombre calculé est supérieur au nombre standard, la VI a une influence significative sur la VD, sinon l'influence n'est pas significative.

Tableau 5.5 : Définition des VI qui ont l'influence significative sur variation des VD

Variable dépendante	Sources de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Variation de chaque effet	Nombre de Fisher calculé	Nombre de Fisher standard	Influence significative
La durée de vie de l'outil (min)	Mode de lubrification	2	0.3809	0.1904	42.76	3.44	Oui
	Vitesse de coupe	2	0.5528	0.2764	62.06	3.44	Oui
	Variables résiduelles	22	0.098	0.0045		3.44	
Total		27	1.316				
L'effort de coupe (N)	Mode de lubrification	2	1080.36	540.18	44.03	3.44	Oui
	Vitesse de coupe	2	1106.94	553.47	45.11	3.44	Oui
	Variables résiduelles	22	269.9	12.27		3.44	
Total		27	2457.2				
La rugosité de la surface ( $\mu\text{m}$ )	Mode de lubrification	2	0.7543	0.3771	50.91	3.44	Oui
	Vitesse de coupe	2	0.3935	0.1968	26.56	3.44	Oui
	Variables résiduelles	22	0.163	0.0074			
Total		27	1.3108				

Le tableau 5.5 montre que la vitesse de coupe et le mode de lubrification influencent significativement les trois variables dépendantes qui sont les critères de la performance de coupe. Ce résultat montre que le mode de lubrification a une influence significative sur la performance d'usinage d'une pièce en GrA-Ni 10S.4G®.

Nous devons estimer le pourcentage de variation attribuable à chaque source de variation pour connaître l'importance du mode de lubrification pour déterminer la performance de coupe. Le

tableau 5.6 montre l'analyse des variances et le pourcentage de contribution de chaque VI dans la variation de VD.

Tableau 5.6 : Pourcentage de variation attribuable à chaque source de variation

Variable dépendante	Sources de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Variation de chaque effet	Nombre de Fisher calculé	Somme des carrés absolue	Pourcentage de contribution %
La durée de vie de l'outil (min)	Mode de lubrification	2	0.3809	0.1904	42.76	0.372	36.1
	Vitesse de coupe	2	0.5528	0.2764	62.06	0.5439	52.7
	Variables résiduelles	22	0.098	0.0045		0.1158	11.2
Total		27	1.316				
L'effort de coupe (N)	Mode de lubrification	2	1080.36	540.18	44.03	1055.824	43
	Vitesse de coupe	2	1106.94	553.47	45.11	1082.405	44
	Variables résiduelles	22	269.9	12.27		318.9734	13
Total		27	2457.2				
La rugosité de la surface ( $\mu\text{m}$ )	Mode de lubrification	2	0.7543	0.3771	50.91	0.7395	56.4
	Vitesse de coupe	2	0.3935	0.1968	26.56	0.3787	28.9
	Variables résiduelles	22	0.163	0.0074		0.1926	14.7
Totale		27	1.3108				

Le pourcentage de contribution trouvé pour chaque VI montre que les influences des VI sur les trois VD sont considérables. En considérant les résultats mentionnés dans les tableaux 5.5 et 5.6, on peut conclure que :

1. La vitesse de coupe et le mode de lubrification ont une influence significative sur la durée de vie de l'outil (l'usure de l'outil). Le facteur le plus important est la vitesse de coupe avec 52.7 % de contribution à la variabilité de la durée de vie de l'outil. Le mode de lubrification est à un deuxième niveau d'importance et produit 36.1 % de la variabilité de la durée de vie de l'outil. La différence entre les deux pourcentages n'est pas suffisamment grande pour négliger l'influence du mode de lubrification. Alors la vitesse de coupe est le facteur de contrôle de la durée de vie de l'outil et le mode de

lubrification est un facteur important pour optimiser cette VD. Les variables résiduelles sont placées au troisième niveau. Leur pourcentage de contribution à la variabilité de la durée de vie de l'outil est de 11.2 %. Elle n'est pas plus grande que la limite préalable (15 %). Nous confirmons donc les résultats d'analyse pour cette VD, mais nous savons que 11.2 % n'est pas négligeable. L'influence des variables résiduelles de 2 à 10 % est normale parce que le procédé d'usinage dépend de plusieurs VI autres que la vitesse de coupe et du mode de lubrification. À notre avis, ce pourcentage montre qu'il y a : a) une très faible probabilité d'avoir une ou plusieurs variables non ou mal maîtrisées pendant l'exécution des essais; b) une probabilité de mauvaise maîtrise des autres variables ou que les conditions expérimentales n'ont pas été suffisamment contrôlées; c) une probabilité considérable d'avoir des erreurs au cours des mesures de l'usure de l'outil. La méthode utilisée est fortement dépendante de l'erreur humaine; d) aucune probabilité qu'une variable importante ait été omise du plan d'expérience ou qu'elle n'ait pas pu être maîtrisée pendant l'usinage.

2. Les deux VD ont des influences significatives sur l'effort de coupe. La vitesse de coupe avec 44 % et le mode de lubrification avec 43 % de contribution à la variabilité de l'effort de coupe sont vraiment au même niveau. Il n'y a pas de facteur contrôle, nous pouvons donc les utiliser sans préférence pour maîtriser ou optimiser l'effort de coupe. Les 13 % de contribution à la variabilité de l'effort de coupe est acceptable ( $13 \% < 15 \%$ ). Toutefois, il est suffisamment grand pour attirer notre attention. À notre avis, ce pourcentage montre qu'il y a : a) une possibilité très faible d'avoir une variable inconnue et non maîtrisée pendant les essais; b) une probabilité faible que les conditions expérimentales n'aient pas été suffisamment contrôlées; c) une probabilité très faible (négligeable) que les résultats obtenus présentent une erreur de mesure des variables; d) une probabilité considérable d'avoir des variables bruits suffisamment fortes pour produire ces pourcentages (vibration de l'outil, mauvais positionnement des buses d'arrosage, etc.); e) aucune probabilité qu'une variable importante ait été omise du plan d'expérience ou n'ait pas pu être maîtrisée pendant l'usinage.
3. En considérant que les deux VD ont des effets significatifs sur la rugosité de la surface de la pièce usinée, nous cherchons le facteur contrôle. Le mode de lubrification avec 56.4 % de contribution à la variabilité de la rugosité de la surface est le facteur contrôle

et la vitesse de coupe avec 28.9 % est une variable importante. Les variations résiduelles de 14.7 % ont une contribution assez forte dans la variabilité de la rugosité de la surface. On peut soupçonner que : a) une variable importante ait été omise du plan d'expérience ou n'ait pas pu être maîtrisée pendant l'usinage (faible probabilité); b) un ou deux facteurs ont été omis ou les conditions expérimentales n'ont pas été suffisamment contrôlées; c) les résultats obtenus présentent une erreur de mesure.

Avec les résultats d'analyse des données, nous pouvons estimer la réponse moyenne espérée pour chaque combinaison des conditions de coupe. Nous validons les réponses moyennes espérées par les données brutes de notre plan d'expérience en utilisant l'intervalle de confiance déterminé. Pour déterminer l'intervalle de confiance, on considère un niveau de confiance de 95 %. Après validations des réponses moyennes espérées, nous les utilisons comme données pour l'optimisation de notre processus. Le tableau 5.7 présente les réponses moyennes espérées et l'intervalle de confiance pour un niveau de confiance de 95 %.

Tableau 5.7 : Réponses moyennes espérées pour chaque combinaison des conditions de coupe

NC	Variables indépendantes		Variables dépendantes					
	ML	V <sub>c</sub> (m/min)	T (min)	Intervalle de confiance	F <sub>c</sub> (N)	Intervalle de confiance	R <sub>a</sub> (μm)	Intervalle de confiance
1	Sec	100	1.9	0.06	106.23	3.13	0.95	0.077
2	Sec	150	1.73	0.06	99.9	3.13	1.02	0.077
3	Sec	200	1.55	0.06	90.64	3.13	1.23	0.077
4	AC*	100	2.12	0.06	117.71	3.13	0.63	0.077
5	AC	150	1.95	0.06	111.38	3.13	0.7	0.077
6	AC	200	1.77	0.06	102.12	3.13	0.91	0.077
7	LM**	100	2.17	0.06	120.98	3.13	0.56	0.077
8	LM	150	2	0.06	114.64	3.13	0.63	0.077
9	LM	200	1.82	0.06	105.39	3.13	0.85	0.077

\* Arrosage copieux

\*\* Lubrification minimale

Selon notre calcul de l'effort de coupe, seulement une donnée est à l'extérieur de l'intervalle de confiance accepté, pour la durée de vie de l'outil trois données représentent une erreur de grandeur de 10 %, ce qui est acceptable. L'erreur pour la rugosité de la surface est d'environ 10 %, mais nous discuterons de cette erreur dans la partie de discussion.

L'approche de méthode Taguchi est très efficace qui identifie les variables indépendantes importantes et détermine les conditions optimales pour un processus avec un temps et un coût minimum. Mais il n'y a pas de tendance pour définir les raisons d'existence des différences mentionnées ci-dessus et de rentrer dans les détails. Pour définir les raisons et les détails, nous allons faire une visualisation des données et ensuite nous trouverons les raisons d'existence des différences mentionnées ci-dessus.

### **5.3 Visualisation de données et discussion**

Pour bien montrer les influences de la vitesse de coupe et le mode de lubrification (VI) sur les critères de coupe (VD), on peut utiliser la valeur moyenne de chaque niveau de chaque VI. Les figures qui montrent les valeurs de chaque variable dépendante en fonction des VI sont les autres figures qui sont très appliquées. Cette section est divisée en trois parties et chacune présente la discussion concernant une variable dépendante.

#### **5.3.1 Durée de vie de l'outil**

La figure 5.1 présente la durée de vie de l'outil en fonction de la vitesse de coupe et du mode de lubrification. On peut voir qu'une augmentation de la vitesse de coupe diminue la durée de vie de l'outil. Cette diminution dans l'intervalle de vitesse de 100 (m/min) à 200 (m/min) est quasi linéaire. L'utilisation du fluide de coupe au cours de l'usinage diminue l'usure de l'outil et augmente la durée de vie de l'outil.

L'effet interactionnel entre la vitesse de coupe et le mode de lubrification est remarquable. À la vitesse de 100 (m/min), l'arrosage copieux produit la meilleure durée de vie de l'outil, constatez les figures 5.1 et 5.3. À la vitesse de 150 (m/min), l'arrosage copieux et la lubrification minimale ont les mêmes valeurs de durée de vie de l'outil. À la vitesse de 200 (m/min), la lubrification minimale devient plus efficace et produit la durée de vie de l'outil la plus longue.

Ce phénomène peut être expliqué en considérant les principes suivants :

- 1- L'usure principale de l'outil, au cours de l'usinage du GrA-Ni 10S.4G (en général CsMAIPA-SiC ou CsMAIPA-SiC), est l'usure abrasive. Ce type d'usure croît lorsque la température augmente.



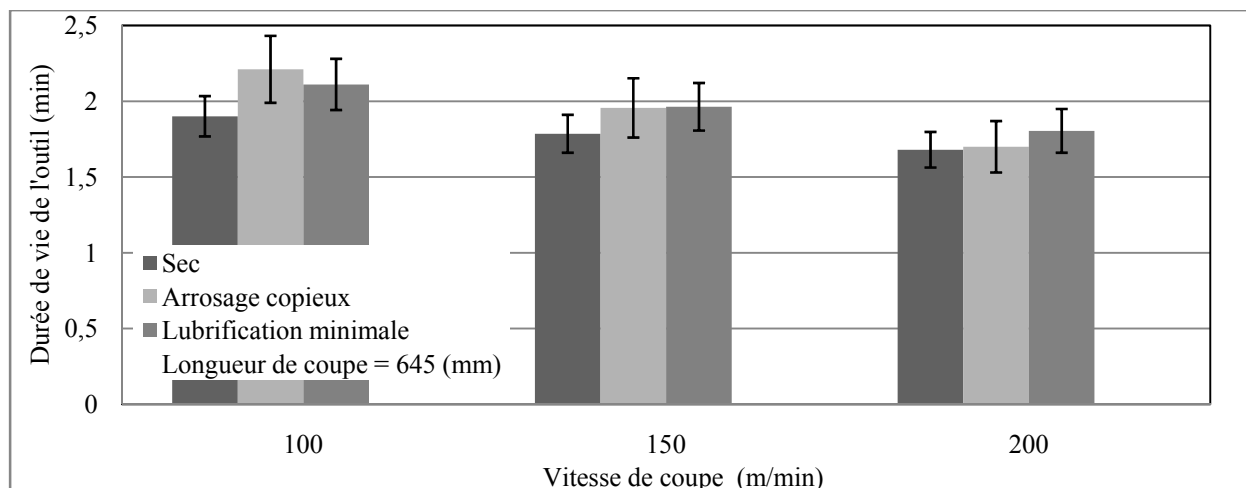


Figure 5.1 : Durée de vie de l'outil pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage.

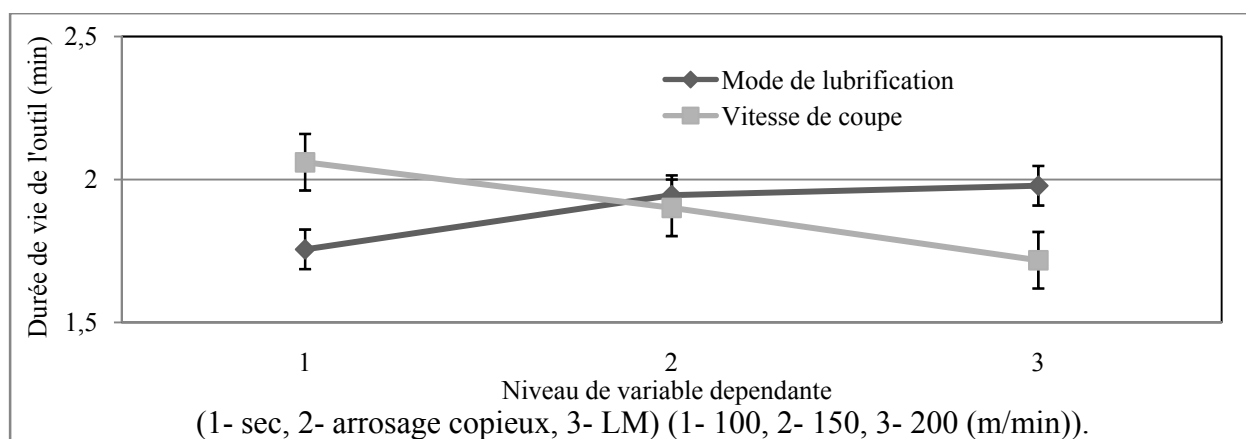


Figure 5.2 : Moyenne de la durée de vie de l'outil pour chaque niveau de VI. (1- sec, 2- arrosage copieux, 3- LM) (1- 100, 2- 150, 3- 200 (m/min)).

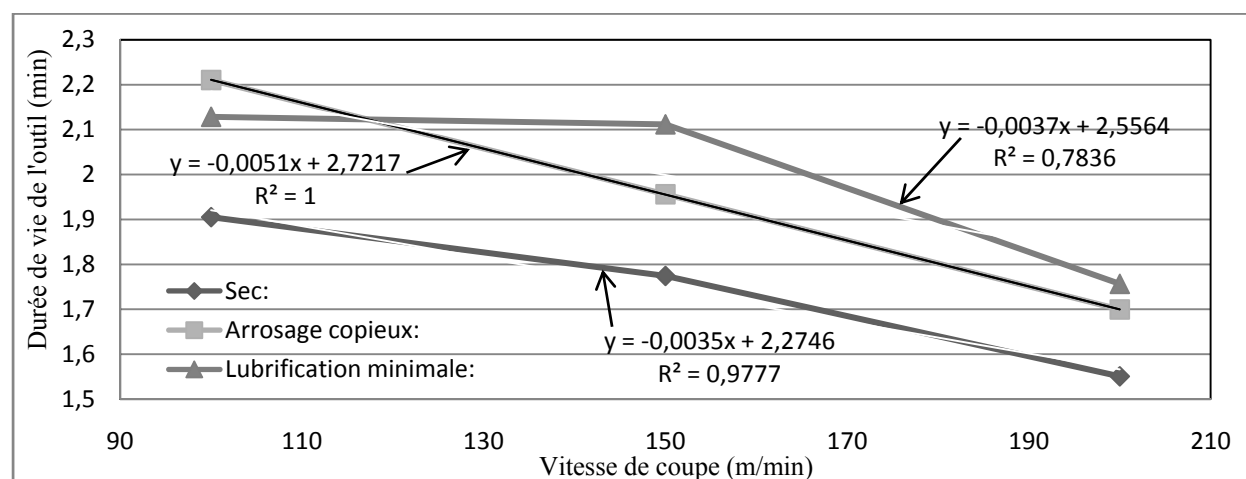


Figure 5.3 : Moyenne de la durée de vie de l'outil pour chaque niveau en fonction de la vitesse de coupe.

- 2- L'augmentation de la vitesse de coupe augmente le taux de génération de chaleur produite.
- 3- Généralement, à haute vitesse de coupe, le fluide ne peut pas arriver aux interfaces de contact, ce qui diminue fortement l'efficacité de l'application du fluide de coupe.
- 4- L'augmentation de la température de la zone de coupe provoque une évaporation des fluides en contact avec ses surfaces très chaudes, des couches sont alors formées sur ces surfaces. Ces couches augmentent la résistance thermique et diminuent le taux de transfert de chaleur.
- 5- Le taux de pénétration du fluide dans la zone de coupe ne dépend pas seulement de la pression et de la vitesse du fluide, il dépend aussi de la structure et de la taille des éléments du fluide.

Cependant, en prenant en compte les 5 items ci-dessus, nous pouvons expliquer le phénomène de la durée de vie de l'outil. À basse vitesse, l'arrosage copieux donne la meilleure durée de vie d'outil parce que, premièrement, une grande quantité de liquide de coupe (arrosage copieux) peut arriver à la zone de coupe et lubrifier les interfaces outil-copeau-pièce. Deuxièmement, le taux de génération de chaleur n'est pas élevé, les surfaces de la zone de coupe ne sont pas très chaudes (paramètre important qui diminue l'efficacité du fluide de coupe). À vitesse moyenne (150 (m/min)), le fluide sans pression (arrosage copieux) n'a pas une pénétration suffisante pour arriver à la zone de coupe. De plus, les fluides qui arrivent à la zone de coupe sont en contact avec une surface de température supérieure (refroidissement moindre et génération supplémentaire de chaleur). Ils forment une surface de vapeur sur la surface et diminuent le taux de transfert de chaleur. Dans le même temps, l'augmentation de la température diminue le pouvoir lubrifiant du fluide de coupe. L'influence de l'arrosage copieux diminue très rapidement. Par contre, pour la lubrification minimale, le taux de pénétration dans la zone de coupe évolue peu : la pression de l'air aide de petites gouttes de fluide à arriver dans la zone de coupe. En même temps, l'air comprimé refroidit très bien la zone de coupe, donc le fluide peut lubrifier la zone de coupe. À cause de ces raisons, la diminution de la durée de vie de l'outil pour la lubrification minimale, pour des vitesses comprises entre 100 à 150 (m/min), est très faible. À haute vitesse (200 (m/min)), la durée de vie de l'outil sous l'arrosage copieux diminue très rapidement. Le taux de diminution de la durée de vie de l'outil augmente parce que : a) le taux de

particules SiC enlevées augmente fortement : l'air comprimé ne peut pas évacuer toutes les particules; b) la quantité de fluide qui peut pénétrer dans la zone de coupe diminue.

Selon nos résultats, la lubrification augmente toujours la durée de vie de l'outil. Cependant, pour les usinages à hautes vitesses, l'influence de la lubrification minimale et de l'arrosage copieux diminue fortement, elle se rapproche de celle de l'usinage à sec.

### **5.3.2 Effort de coupe**

Les figures 5.4, 5.5 et 5.6, montrent que durant nos essais, l'effort minimum de coupe est produit avec l'usinage à sec. Les raisons sont : a) l'augmentation de la température de la pièce, au cours de l'usinage à sec, est plus rapide que pour l'usinage sous les deux autres modes d'arrosage. Donc, le matériau usiné s'adoucit de manière plus importante et l'effort de coupe diminue plus que pour les deux autres conditions d'usinage. b) Pendant l'usinage à sec, les particules de graphite du matériau usiné ont été libérées, fondent et produisent une couche lubrifiante sur les surfaces de contact. Cette couche lubrifiante a un effet à haute température et diminue l'effort de coupe.

Une interrogation persiste : pourquoi l'effort de coupe pendant l'usinage sous lubrification minimale est plus grand que celui de l'usinage sous arrosage copieux? Une explication de ce phénomène est sûrement qu'il y a un phénomène de micro rectification. Les particules de SiC libérées du matériau usiné produisent avec les petites quantités de fluide de coupe (LM) un système de micro rectification qui augmente l'effort de coupe. Pendant l'usinage sous arrosage, la taille des particules du fluide ne permet pas au fluide d'entrer dans la zone de coupe et produit un système de micro lubrification.

### **5.3.3 Rugosité de la surface**

Comme les figures 5.7 et 5.8 le montrent l'augmentation de la vitesse de coupe améliore la rugosité de la surface usinée. La figure 5.9 présente le changement de la rugosité de la surface en fonction de la vitesse et du mode de lubrification. Les figures peuvent confirmer que la lubrification minimale produit toujours la meilleure rugosité pour la surface usinée.

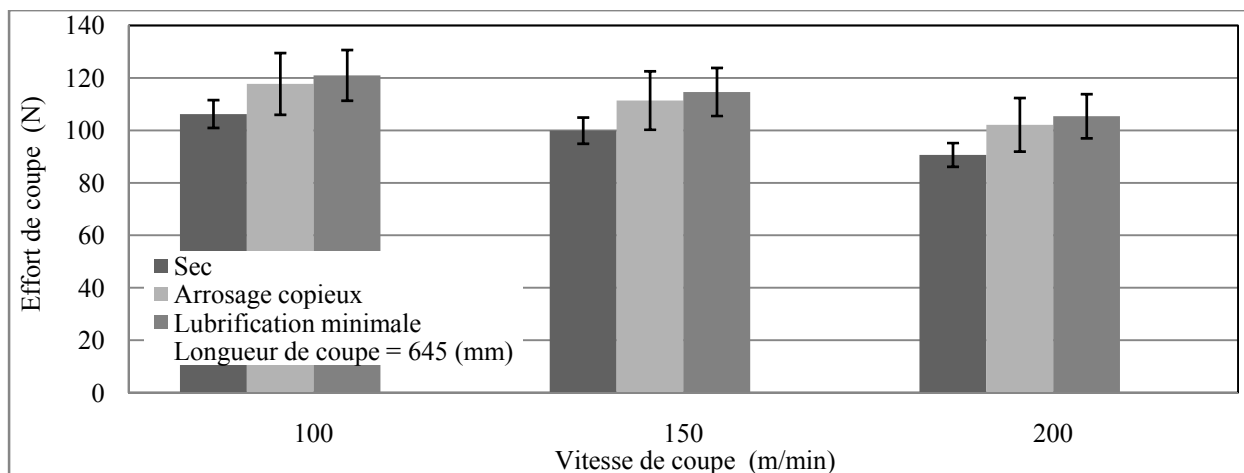


Figure 5.4 : Effort de coupe pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage.

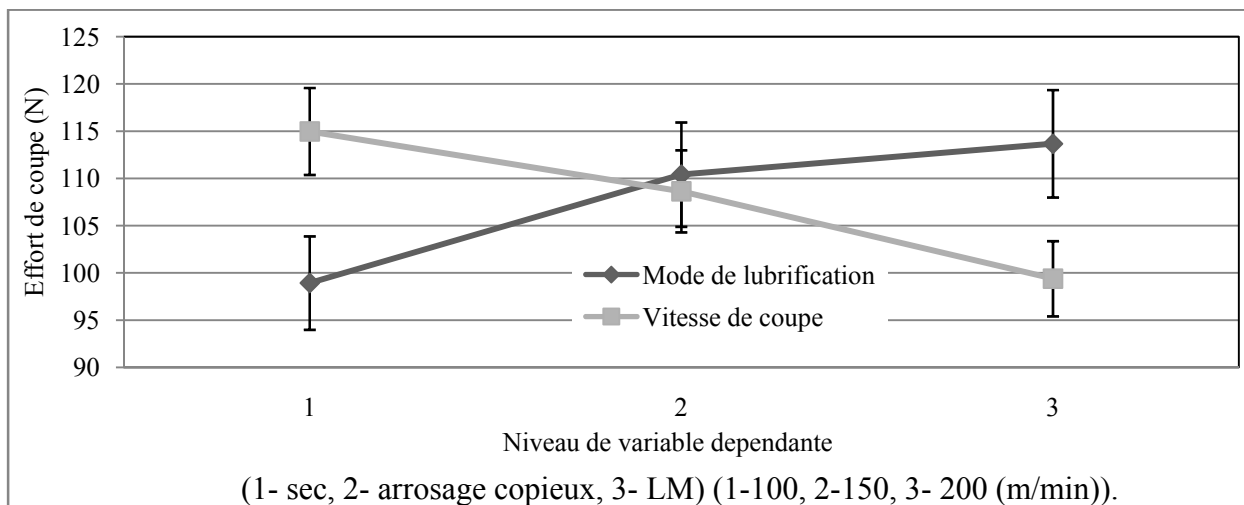


Figure 5.5 : Moyenne de l'effort de coupe pour chaque niveau de VI.

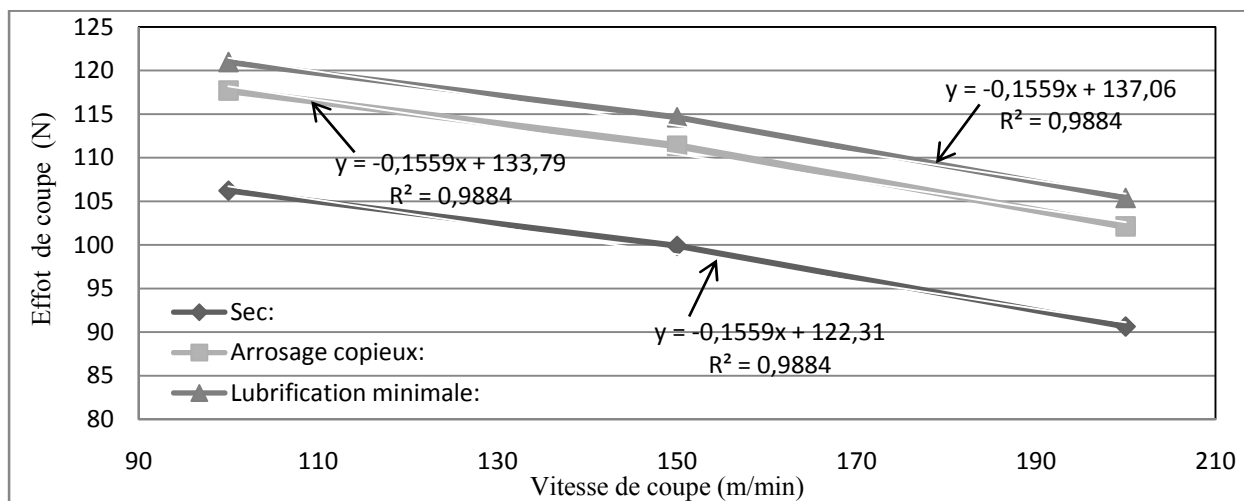


Figure 5.6 : Moyenne de la durée de vie de l'outil pour chaque niveau en fonction de la vitesse de coupe.

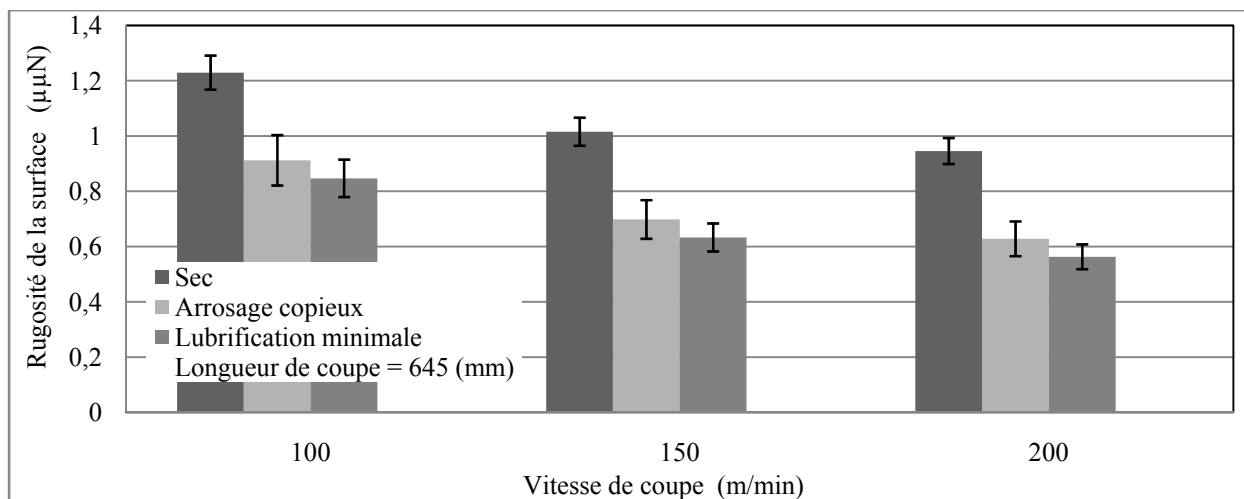


Figure 5.7 : Rugosité de la surface pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage.

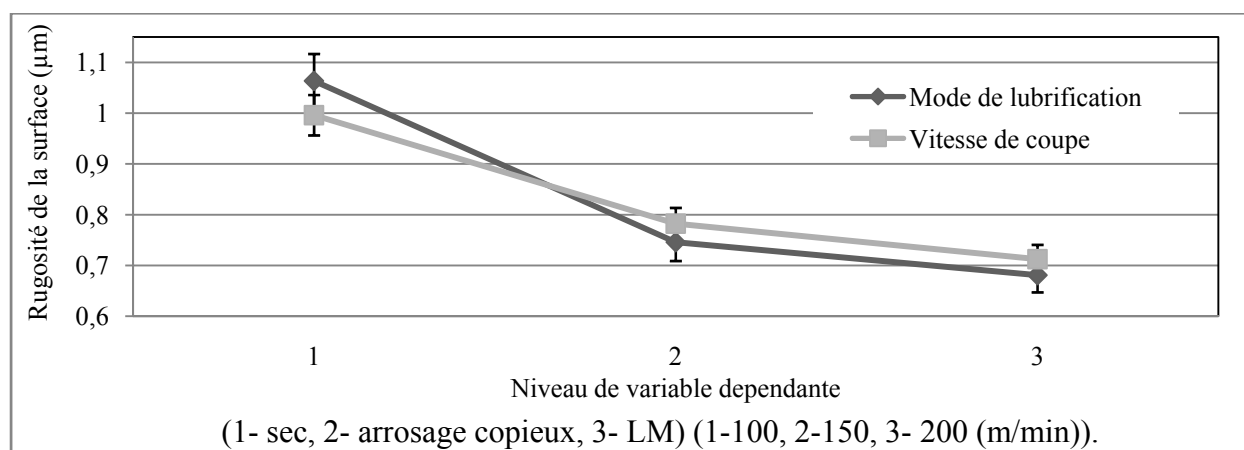


Figure 5.8 : Moyenne de la rugosité de la surface pour chaque niveau de VI. (1- sec, 2- arrosage copieux, 3- LM) (1-100, 2-150, 3- 200 (m/min)).

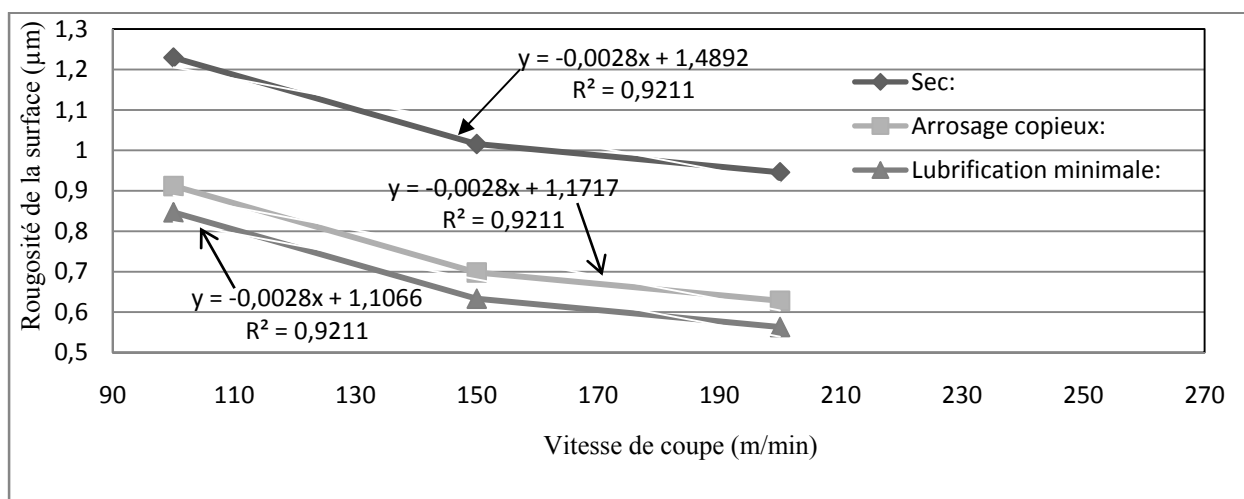


Figure 5.9 : Moyenne de la rugosité de la surface pour chaque niveau en fonction de la vitesse de coupe.

## CHAPITRE 6 OPTIMISATION

### Introduction

L'optimisation des processus et des activités de fabrication mécanique est de plus en plus utilisée pour maximiser les bénéfices économiques. La bonne connaissance des méthodes d'optimisation est nécessaire. Ce chapitre présente une méthode pour l'optimisation d'un processus de fraisage. Cette méthode détermine l'influence des variables indépendantes sur le temps et le coût unitaire. Dans notre cas, il s'agit de l'influence du mode d'arrosage sur la performance de coupe du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>.

Nous avons élaboré trois parties complémentaires qui permettent d'optimiser un processus d'usinage. En premier lieu, nous avons créé une base de données des connaissances de la méthode d'optimisation d'un processus d'usinage à partir de différentes références [164-168]. En second lieu, nous avons créé une base de données expérimentale pour différentes conditions de coupe. Cette base de données présente les valeurs des différents critères de la performance de coupe pour chaque condition de coupe. Enfin, nous avons créé une base de données financière qui correspond à un cas industriel général.

L'optimisation de notre processus et la discussion des résultats sont les étapes suivantes de notre recherche présentées à la fin du chapitre.

### 6.1 Optimisation de l'usinage

Pour chaque cas d'optimisation, il y a plusieurs solutions possibles. La meilleure solution est celle qui minimise ou maximise la fonction objective. Les différentes méthodes qui permettent d'optimiser un processus d'usinage peuvent être catégorisées selon leurs buts : (1) cadence de production maximale (optimiser le temps d'usinage); (2) coût minimal (optimiser le coût d'usinage); (3) profit maximal.

#### 6.1.1 Cadence de production maximale

Aujourd'hui, les entreprises souhaitent accroître leurs cadences de production afin de prendre une position dominante sur le marché. Pour matérialiser cet objectif, elles doivent augmenter leurs capacités de production et le premier moyen pour cela est de minimiser le temps nécessaire pour

fabriquer un produit. Pour un processus d'usinage, nous pouvons maximiser la cadence de production en minimisant le temps de fabrication unitaire d'une pièce.

Le temps de fabrication unitaire d'une pièce ( $T_u$ ) est :

$$T_u = T_1 + T_2 + T_3 \quad (\text{min/pièce}) \quad (6.1)$$

où :

- $T_1$  : est le temps par pièce imputable à la préparation et aux temps hors coupe (en général, ces derniers ont une valeur fixe) :

$$T_1 = T_m + T_{tm} + T_f + T_s/N_p \quad (\text{min/pièce}) \quad (6.2)$$

où :

- $T_m$  : est le temps humain (min/pièce) qui correspond à un travail humain (physique ou mental); par exemple, le temps de montage et de démontage de la pièce, le temps de nettoyage de la table de machine, etc.

- $T_{tm}$  : est le temps technico-humain (min/pièce) qui est le temps de travail pendant lequel l'activité de l'exécutant dépend des conditions techniques de transformation physique, chimique, etc., de la matière ou du comportement des machines, outillages et appareils; par exemple, le temps d'approche et de recul de l'outil, le temps d'échauffement de la machine, etc.

- $T_f$  : est le temps fréquentiel (min/pièce) qui présente le temps correspondant à un travail répété de toutes les  $n$  unités de production au cours de l'exécution d'une opération (par exemple, la vérification dimensionnelle d'une pièce sur 25);

- $T_s$  : est le temps de préparation (min/série de production), il exprime le temps correspondant à des travaux exécutés une seule fois par série lancée d'unité de production; ce temps peut se situer au début et/ou à la fin de la série;

- $N_p$  : est le nombre de pièces d'une série de production; il est déterminé par la stratégie de production de l'entreprise;

- $T_2$  : est le temps par pièce imputable à la coupe :

$$T_2 = T_t \quad (\text{min/pièce}) \quad (6.3)$$

où :

- $T_t$  : est le temps de travail et dépend uniquement des conditions techniques d'exécution. Il s'appelle le temps technologique (min/pièce). Son calcul est réalisé en considérant les paramètres de coupe (vitesse de coupe, largeur de coupe, profondeur de coupe, etc.).

- $T_3$  : est le temps par pièce imputable au changement de l'outil :

$$T_3 = T_{co} \times [(T_t/T) - (1/N_p)] \quad (\text{min/pièce}) \quad (6.4)$$

où :

- $T_{co}$  : est le temps d'arrêt de la machine pour changer l'outil (plaquettes) et éventuellement l'affûter (min);

- $T$  : est la durée de vie de l'outil (min).

En remplaçant les valeurs de  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  dans la formule (6.1); nous obtenons :

$$T_u = (T_t + T_m + T_{tm} + T_f) + T_{co} \times [(T_t/T) - (1/N_p)] + (T_s/N_p) \quad (\text{min/pièce}) \quad (6.5)$$

Le terme  $(T)$  n'est pas beaucoup employé dans le milieu industriel. Sa formule (6.5) est donnée sous une forme plus pratique :

$$T_u = (T_t + T_m + T_{tm} + T_f) + T_{co} \times (n_{co}/N_p) + (T_s/N_p) \quad (\text{min/pièce}) \quad (6.6)$$

où :

- $n_{co}$  : est le nombre de changements d'outil pour exécuter l'opération d'usinage d'une série de  $N$  pièces.

### 6.1.2 Coût minimal

Dans une structure de marché compétitive, le prix d'un produit est un facteur très important. Un prix élevé, qui est dans la majorité des cas dû à un coût total élevé, peut mener à une forte diminution de la part du marché du produit. La minimisation du coût total de production est donc un objectif principal pour la plupart des entreprises. Pour une pièce usinée, le coût total est fortement dépendant des frais machines ( $C_m$ ) et des frais d'outils coupants ( $C_s$ ).

Les frais machines ( $C_m$ ) sont fonction du temps passé à l'exécution des pièces et du coût horaire des machines-outils utilisées (\$/h).

Le tableau 6.1 présente toutes les formules nécessaires pour calculer les frais machines.



Tableau 6.1 : Frais machines et ses paramètres

Élément	Moyen de calcul	Définition des paramètres
Frais machines $C_m$	$C_m = A + F + R + L + E + S \quad (\$/h) \quad (6.7)$	-----
Amortissement technique $A$	$A = P_m / (H \times N_a) \quad (\$/h) \quad (6.8)$	$P_m$ : valeur actualisée de l'installation à l'état neuf, avec les équipements (\$). $N_a$ : nombre d'années d'amortissement (de 5 à 10 ans) (an). $H$ : nombre d'heures effectives d'utilisation de la machine par an (h).
Frais financiers $F$	$F = (P_m \times i) / (2 \times 100 \times H) \quad (\$/h) \quad (6.9)$	$i$ : taux d'intérêt de placement du capital investi, de 8 à 20 a amortissements linéaires (%).
Frais d'entretien et de réparation $R$	$R = (P_m \times q) / (100 \times H) \quad (\$/h) \quad (6.10)$	$q$ : quote-part d'entretien annuel, de 3 à 8 % selon la complexité de la machine (%).
Frais de locaux $L$	$L = (l \times S_u) / H \quad (\$/h) \quad (6.11)$	$l$ : prix du loyer au $m^2$ , (éclairage, chauffage, etc.) (\$). $S_u$ : aire occupée par le poste de travail (machine, équipement, stock de pièces, etc.) ( $m^2$ ).
Frais d'énergie $E$	$E = e \times F_n \times N_n / 100 \quad (\$/h) \quad (6.12)$	$e$ : prix du KWh (\$/KWh). $F_n$ : facteur de puissance de 20 à 60 suivant le type de fabrication (%). $N_n$ : puissance nominale installée (KW)
Charges salariales et sociales $S$	$S = [S_o + (F \times S_e / 100)] \times F_g / 100 \quad (\$/h) \quad (6.13)$	$S_o$ : salaire horaire de l'ouvrier (\$/h). $S_e$ : salaire de l'encadrement (\$/h). $F$ : pourcentage d'utilisation de l'encadrement pour la machine (%). $F_g$ : pourcentage des frais généraux sur le salaire, de 160 à 220 selon les entreprises et les provinces (%).

Les effets indésirables de l'usure des arêtes de coupe nous obligent à changer l'outil ou les plaquettes. Donc, pendant l'usinage, nous avons les frais outils-coupants ( $C_s$ ) qui sont fonctions du coût des plaquettes ou de l'outil de coupe et du coût du temps d'arrêt de la machine pour changer l'outil (plaquettes), éventuellement l'affûter :

$$C_s = C_{ou} + C_{tco} \quad (\$/\text{arête}) \quad (6.14)$$

où :

- $C_{ou}$  : est le prix des nouvelles plaquettes (outil neuf) qui sont utilisées pour remplacer les plaquettes usées (l'outil usé) (\$/arête).

- $C_{tco}$  : est le coût du temps d'arrêt de la machine pour changer les plaquettes ou l'outil :

$$C_{tco} = C_m \times T_{co} \quad (\$/\text{arête}) \quad (6.15)$$

Le coût unitaire (coût total d'une pièce usinée) ( $C_u$ ), comme la figure 6.1 le montre, est fonction des différentes variables :

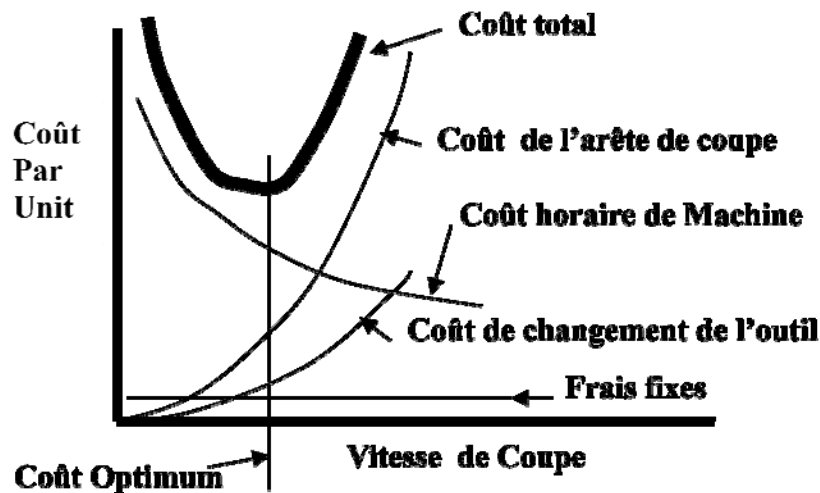


Figure 6.1 : Coût unitaire en fonction des différents éléments [19].

Le tableau 6.2 présente toutes les formules et les renseignements nécessaires pour calculer le coût unitaire (7.16). Pour minimiser le coût total de la production, il suffit de minimiser le coût unitaire. Il est remarquable que dans la majorité des références consultées, le coefficient des coûts non prévisibles ne se multiplie pas aux frais fixes. Cependant, nous sommes d'avis de le faire.

Tableau 6.2 : Coût unitaire et ses éléments

Élément	Définition	Moyen de calcul
$C_u$	Coût unitaire : coût total pour la production d'une pièce	$C_u = [(C_f/N_p) + C_p + C_t + C_{tm} + C_o] \times K \quad (\$/pièce) \quad (6.16)$
$C_f$	Frais fixe : tous les frais de la préparation pour une série de production	<b>Frais matières premières+Frais de lancement (planning, stockage, manutention) +Frais de préparation des machines et des outils+Frais d'études (conception du produit, dossier de fabrication) +Frais de construction d'outillage+ etc.</b> (\$) (6.17)
$C_p$	Coût imputable au temps de préparation pour chaque série de production	$C_p = (T_s/N) \times (A_p/60) \quad (\$/pièce) \quad (6.18)$
$A_p$	Taux global d'exploitation	<b><math>A_p =</math> taux global d'exploitation de la section préparation, frais généraux et main-d'œuvre par heure</b> (6.19)
$C_t$	Coût imputable au temps de coupe	$C_t = T_t \times (C_m/60) \quad (\$/pièce) \quad (6.20)$
$C_{tm}$	Coût imputable au temps hors coupe	$C_{tm} = (T_m + T_{tm} + T_f) \times (C_m/60) \quad (\$/pièce) \quad (6.21)$
$C_o$	Coût imputable au changement de l'outil	$C_o = C_s \times (n_{co}/N_p) \quad (\$/pièce) \quad (6.22)$
$K$	Coefficient des coûts non prévisibles	<b>Selon le cas choisira entre 1.1 et 1.3</b>

### 6.1.3 Profit maximal

Dans chaque entreprise, le profit qui représente la différence entre les recettes et l'ensemble des dépenses liées à la production et à la vente de biens et services est une variable à maximiser pour l'entrepreneur qui dirige l'entreprise. En général, pour maximiser le profit, il faut minimiser les dépenses et en même temps maximiser les recettes. Nous considérons uniquement les situations qui donnent une valeur fixe pour les recettes. Ces situations peuvent être rencontrées dans

n'importe quelle entreprise ou fournisseur de pièces où le nombre de pièces produites et le prix de vente des pièces dépendent d'un contrat avec un partenaire, donc nous avons :

$$R \text{ (Recette totale)} = \text{Prix de la pièce} \times N_p \quad (\$) \quad (6.23)$$

$$C \text{ (Coût total)} = C_u \times N_p \quad (\$) \quad (6.24)$$

$$P \text{ (Profite total)} = R \text{ (Recette totale)} - C \text{ (Coût total)} \quad (\$) \quad (6.25)$$

## 6.2 Valeurs des critères de la performance de coupe

Les valeurs des variables dépendantes pour chaque combinaison des conditions de coupe sont les réponses moyennes espérées selon le calcul statistique de la méthode Taguchi. Le tableau 6.3 présente ces valeurs.

Tableau 6.3 : Réponses moyennes espérées pour chaque combinaison des conditions de coupe

Numéro des combinaisons NC	Variables indépendantes		Variables dépendantes		
	Mode de lubrification ML	Vitesse de coupe $V_c$ (m/min)	Durée de vie de l'outil T (min)	Effort de coupe $F_c$ (N)	Rugosité de la surface $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
1	Sec	100	1.9	106.23	0.95
2	Sec	150	1.73	99.9	1.02
3	Sec	200	1.55	90.64	1.23
4	AC*	100	2.12	117.71	0.63
5	AC	150	1.95	111.38	0.7
6	AC	200	1.77	102.12	0.91
7	LM**	100	2.17	120.98	0.56
8	LM	150	2	114.64	0.63
9	LM	200	1.82	105.39	0.85

\* Arrosage copieux

\*\* Lubrification minimale

### 6.3 Données financières

Les données financières sont déterminées pour correspondre à un cas industriel général.

Tableau 6.4 : Valeurs des variables dépendantes prévues pour chaque combinaison des conditions de coupe

Longueur de la pièce à usiner	<b>L=215</b>	<b>(mm)</b>
Largeur de la pièce à usiner	<b>W=36</b>	<b>(mm)</b>
Profondeur de coupe nécessaire	<b>h=2</b>	<b>(mm)</b>
Nombre de pièces de la série	<b>N<sub>p</sub>=20000</b>	
Diamètre de l'outil	<b>D=0.018542</b>	<b>(m)</b>
Temps de préparation	<b>T<sub>s</sub>=120</b>	<b>(min/série)</b>
Temps humain	<b>T<sub>m</sub>=0.5</b>	<b>(min/pièce)</b>
Temps technico-humain	<b>T<sub>tm</sub>=0.45</b>	<b>(min/pièce)</b>
Temps fréquentiel	<b>T<sub>f</sub>=1.5</b>	<b>(min/pièce)</b>
Temps de changement d'outil	<b>T<sub>co</sub>=1</b>	<b>(min/arrête)</b>
Valeur de la machine au moment de l'installation	<b>P<sub>m</sub>=60000</b>	<b>(\$)</b>
Nombre d'heures effectives par an	<b>H=N<sub>d</sub>×N<sub>m</sub>×h<sub>m</sub>×t<sub>u</sub></b>	<b>(h)</b>
Nombre années d'amortissement	<b>N<sub>a</sub>=15</b>	<b>(an)</b>
Taux d'intérêt du capital	<b>i=8</b>	<b>(%)</b>
Taux d'inflation depuis l'installation jusqu'à présent	<b>ia=1</b>	<b>(%/an)</b>
Quote-part d'entretien annuel	<b>q=7</b>	<b>(%)</b>
Prix du loyer au m <sup>2</sup>	<b>l=15</b>	<b>(\$/m<sup>2</sup>)</b>
Aire occupée par le poste de travail	<b>S<sub>u</sub>=25</b>	<b>(m<sup>2</sup>)</b>
Prix d'énergie	<b>e=0.15</b>	<b>(\$/KW)</b>
Facteur de puissance*	<b>F<sub>N</sub>=</b> <b>(35+0.05×F<sub>c</sub>)</b>	<b>(%)</b>
Puissance nominale installée	<b>N<sub>n</sub>=25</b>	<b>(KWh)</b>
Salaire de l'ouvrier	<b>S<sub>o</sub>=35</b>	<b>(\$/h)</b>
Salaire de l'encadrement	<b>S<sub>e</sub>=55</b>	<b>(\$/h)</b>
Pourcentage d'utilisation de l'encadrement	<b>F=12</b>	<b>(%)</b>
Pourcentage des frais généraux	<b>F<sub>g</sub>=220</b>	<b>(%)</b>
Prix de la plaquette (neuve)	<b>C<sub>pn</sub>=16.7</b>	<b>(\$)</b>
Nombre d'arêtes de la plaquette	<b>N<sub>a</sub>=1</b>	
Taux global d'exploitation et de préparation	<b>Ap=80</b>	<b>(\$)</b>
Nombre de quarts par jour	<b>Nd=1</b>	
Nombre de mois de travail par an	<b>Nm=11</b>	<b>(mois)</b>
Nombre d'heures de travail par mois	<b>hm=173</b>	<b>(h)</b>
Taux moyen d'utilisation de la machine	<b>tu=0.81</b>	
Frais fixes	<b>Ff=300000</b>	<b>(\$)</b>
Coefficient des coûts non prévisibles	<b>K=1.2</b>	

\* cette équation, construite selon nos expériences sur notre machine, n'est valide que sur cette machine.

## 6.4 Optimisation

Pour optimiser le profit total, les étapes suivantes doivent être suivies :

1. Trouver le coût unitaire correspondant à chaque combinaison des conditions de coupe et déterminer la combinaison qui produit le coût unitaire minimal de production.
2. Vérifier si les valeurs des variables dépendantes sont acceptables dans la combinaison qui représente le coût unitaire minimal. Sinon, choisir une autre combinaison produisant le coût unitaire minimum, donnant des valeurs acceptables pour les variables dépendantes.
3. Trouver le temps unitaire correspondant à la combinaison qui représente le coût unitaire minimal et acceptable.
4. Accepter la combinaison des conditions de coût unitaire minimal si le temps unitaire prévu dans ces conditions est acceptable. Sinon, trouver une autre combinaison pour avoir le coût minimal possible dans un intervalle de temps prévu de la production.
5. Faire des essais dans ces conditions pour valider les résultats du plan d'expérience.

En effet, l'optimisation de notre cas n'est pas très complexe, en réalisant tous les calculs nécessaires par un programme que j'ai écrit. Voici le programme et les résultats :

```
disp('*****')
% Optimisation
disp('*****')
% 1-Temps unitaire
clear
cLc
PC= [
    1 100
    1 150
    1 200
    2 100
    2 150
    2 200
```

3 100

3 150

3 200];

t= [

1.895

1.728

1.545

2.118

1.950

1.767

2.168

2.001

1.818];

f= [

106.228

99.893

90.635

117.712

111.377

102.119

120.978

114.643

105.385];

r= [

0.946

1.016

1.229

0.628

0.698

0.912

0.563

0.633

0.847];

disp('\*\*\*\*\*')

Lp=215; % Longueur du trajet de l'usinage (mm).

Wp=120; % Largeur du trajet de l'usinage (mm).

wp=12; % Largeur de coupe (mm).

ap=2; % Hauteur du trajet de l'usinage (mm).

AP=2; % Profondeur de coupe (mm).

Nps=20000; % Nombre de pièces de la série.

D=0.0185421; % Diamètre de l'outil (m).

ts=120; % Temps de préparation (min/série).

tm=0.5; % Temps humain (min/pièce).

ttm=0.45; % Temps technico-humain (min/pièce).

tf=1.5; % Temps fréquentiel (min/pièce).

tco=1; % Temps de changement de l'outil (min/pièce).

% Détermination du temps unitaire pour chaque combinaison des conditions de coupe.

for i=1:9

ndp(i)=(Wp/wp)\*(ap/AP); % Nombre de passages de l'outil pour surfacer la pièce.

lt(i)=Lp\*ndp(i)/1000; % Longueur total de trajet pour usinage (m).

rpm(i)=PC(i,2)/(pi\*D); % PC(i,2) représente la vitesse de coupe (m/min).

apm(i)=rpm(i)\*0.25/1000; % Vitesse d'avance de l'outil (m/min).

tt(i)=lt(i)/apm(i); % Temps technologique (min/pièce).

nco(i)=(Nps\*tt(i)/t(i))-1; % Nombre de changements d'outil par série.

tu(i)=(tm+ttm+tf+ts/Nps)+tt(i)+(tco\*nco(i)/Nps); % Temps unitaire (min/pièce).

end

disp('\*\*\*\*\*')

## % 2- Coût unitaire

pp=60000; % Prix au moment de l'installation de la machine (tout compris) (\$).

ia=1.1; % Taux d'inflation depuis de l'installation jusqu'à présent.

nds=1; % Nombre du quart du travail par jour.

mpa=11; % Nombre de mois de travail de la machine.



```

hpm=173;          % Heures de travail par mois (h).
tmu=0.81;         % Taux moyen d'utilisation de la machine.
na=15;            % Nombre d'années d'amortissement (an).
ti=0.08;          % Taux d'intérêt.
qpe=0.07;         % Quote-part d'entretien.
l=15;             % Loyer de l'emplacement ($/ m2).
su=25;           % Surface occupée par le poste du travail (m2)
pn=25;            % Puissance de machine (KWh).
fn1=0.35;         % Facteur de puissance.
% fn=(fn1+0.0005*Fc);    %Facteur principal de la puissance qui considère les effets de la
                        % force de coupe sur la %consommation d'énergie.

e=0.15;           % Prix de l'électricité ($/KWh).
Ap=80;            % Taux global d'exploitation ($/h).
so=35;            % Salaire de l'ouvrier ($/h).
fm=0.12;          % Taux d'utilisation de l'encadrement
se=55;            % Salaire de la maîtrise ($/h).
fg=2.2;           % Coefficient pour frais généraux.
ppa=pp*ia;        %Prix actuel en considérant l'inflation ($).
pdp=16.7;         % Prix des plaquettes de l'outil de coupe ($).
ndap=1;           % Nombre d'arête de coupe de l'outil.
hpa=hpm*mpa*nds*tmu; % heures de travail de la machine par an (h).
cout=pdp/ndap;    % Prix de chaque arête coupant de l'outil de coupe ($).
cp=(ts/Nps)*(Ap/60); % Coût du temps de la préparation ($/pièce).
                        % Ap est le frais global d'exploitation de la section préparation ($/h).
Ff=300000;        % Frais fixe ($).
Kk=1.2;           % Coefficient des frais non prévisibles.
for i=1:9
cm(i)=(ppa/(hpa*na))+((ppa*ti)/(2*hpa))+((ppa*qpe)/(hpa))+((l*su)/(hpa))+e*(fn1+0.0005*f(i))
*pn)+(so+(fm*se))*fg; % Frais de machine pour chaque combinaison ($/h).
ct(i)=tt(i)*cm(i)/60; % Coût du temps de coupe ($/pièce).
ctm(i)=(tm+ttm+tf)*cm(i)/60; % Coût du temps hors coupe ($/pièce).

```

```

ch(i)=tco*cm(i)/60; % Coût de changement de l'outil ($/min).
cs(i)=cout+ch(i); % Frais outil coupant ($/arrête).
co(i)=cs(i)*nco(i)/Nps; % Coût du changement de l'outil ($/pièce).
cu(i)=(cp+ct(i)+ctm(i)+co(i)+Ff/Nps)*Kk; % Coût unitaire ($/pièce).
end
{'Temps unitaire','Coût unitaire';[tu(1)],[cu(1)];[tu(2)],[cu(2)/.85];[tu(3)],[cu(3)/.99];[tu(4)],
[cu(4)] [tu(5)],[cu(5)/.85];[tu(6)],[cu(6)/.99];[tu(7)],[cu(7)];[tu(8)],[cu(8)/.85];[tu(9)],[cu(9)/.99]}
disp('*****')
disp('*****')

```

Le tableau 6.5 présente les valeurs du temps unitaire et du coût unitaire pour chaque combinaison des conditions de coupe. Nous voyons que la combinaison numéro 9, avec la vitesse de coupe de 200 (m/min) et sous la lubrification minimale, donne le meilleur coût unitaire. Pour confirmer cette combinaison comme point optimal de notre production, il faut vérifier les valeurs des variables dépendantes et le nombre de pièces produites par année pour valider le résultat de l'optimisation par les résultats expérimentaux.

Tableau 6.5 : Valeurs du temps et du coût unitaire

NC	VI		VD			Temps unitaire $T_u$ (min/pièce)	Coût unitaire $C_u$ (\$/pièce)
	ML	$V_c$ (m/min)	T (min)	$F_c$ (N)	$R_a$ ( $\mu$ m)		
1	Sec	100	1.9	106.23	0.95	4.75	43.47
2	Sec	150	1.73	99.9	1.02	4.04	41.96
3	Sec	200	1.55	90.64	1.23	3.69	35.55
4	AC	100	2.12	117.71	0.63	4.67	41.64
5	AC	150	1.95	111.38	0.7	3.97	40.34
6	AC	200	1.77	102.12	0.91	3.63	34.19
7	LM	100	2.17	120.98	0.56	4.65	41.27
8	LM	150	2	114.64	0.63	3.96	40.02
9	LM	200	1.82	105.39	0.85	3.62	33.92

Les trois étapes mentionnées ci-dessus confirment que réaliser l'usinage dans les conditions de la combinaison numéro 9 nous donne le profit maximal.

1. La force de coupe et la rugosité de la surface usinée sont inférieures aux valeurs limites et sont donc acceptables.
2. Le temps unitaire pour la combinaison numéro 9 nous donne une capacité de production de 25548 (pièce/an), ce qui est supérieur aux 20000 pièces qu'il faut produire par année, donc le temps unitaire est acceptable.
3. Notre plan d'expérience est un plan factoriel complet, nous pouvons l'utiliser pour nos résultats expérimentaux afin de valider le résultat de notre optimisation (nous n'avons pas besoin de faire d'autres essais pour valider le résultat de l'optimisation). Le tableau 6.6 présente les résultats expérimentaux de nos essais pour la combinaison numéro 9. Comme nous pouvons le remarquer, pour les données expérimentales de la combinaison numéro 9, l'intervalle de confiance, pour un niveau de confiance de 95 %, est inférieur aux limites considérées. L'utilisation des moyennes des données expérimentales afin de trouver le temps et le coût unitaire est donc acceptable. La différence entre les deux temps unitaire (calculée par les données statistique et les données expérimentales) est négligeable. Alors, la combinaison optimale ne change pas.

Tableau 6.6 : Valeurs du temps et du coût unitaire pour la combinaison numéro 9 selon les valeurs expérimentales

NC	VI		VD			T <sub>u</sub> (min/pièce)	C <sub>u</sub> (\$/pièce)
	ML	V <sub>c</sub> (m/min)	T (min)	F <sub>c</sub> (N)	R <sub>a</sub> (μm)		
9	LM	200	1.866	104.78	0.81	3.62	33.93
			1.76	105.93	0.8		
			1.83	108.56	0.8		
						(Temps unitaire calculé en utilisant la valeur moyenne de VD)	(Coût unitaire calculé en utilisant la valeur moyenne de VD)
Moyenne de VD		1.82	106.42	0.8			
Variance de VD		0.0027	3.75	0.00002			
Écart type de VD		0.052	1.94	0.0044			
Intervalle de confiance pour un niveau de confiance de 95 %		0.08	2.88	0.006			

## 6.5 Discussion

Étudier les variations des valeurs du temps et du coût unitaire peut nous aider à découvrir l'influence du mode d'arrosage sur la performance d'usinage du composite à matrice d'aluminium, ce qui est le sujet de notre recherche.

Les figures 6.2 et 6.3 montrent que selon les conditions d'usinage et les données financières déterminées :

1. L'usinage sous la LM donne toujours le plus bas coût unitaire et l'usinage à sec produit toujours le plus haut coût unitaire. Pour expliquer ce phénomène, nous pouvons avancer trois raisons : a) le coût unitaire a une petite dépendance (cf. les formules (6.16) et (6.12)) aux variations du coût machine. L'augmentation maximale du coût machine en utilisant un fluide de coupe est de 5 % de la valeur moyenne du coût machine pour toutes les combinaisons. Donc, nous avons seulement une petite augmentation du coût unitaire à cause de l'utilisation du fluide de coupe pendant l'usinage; b) le coût unitaire est fortement dépendant du coût de changement de l'outil (cf. les formules (6.22) et (6.14)), en utilisant le fluide de coupe, le coût du changement de l'outil diminue d'environ 37 % de la valeur moyenne du coût du changement de l'outil pour toutes les combinaisons. Donc, nous avons une forte diminution du coût unitaire à cause de l'utilisation du fluide de coupe; c) dans le chapitre précédent, nous avons vu que l'influence de l'arrosage copieux et de la lubrification minimale sur les critères de la performance d'usinage sont relativement proches. Donc, la LM, avec moins de dépenses (8 %- 10 %), produit un coût unitaire moins élevé que l'arrosage copieux.

Les histogrammes suivants présentent différentes informations et permettent de les comparer. Tous les histogrammes comportent une information complémentaire pour chaque variable : il s'agit de l'étendue des variables qui nous fournit les valeurs minimale et maximale des données collectées.

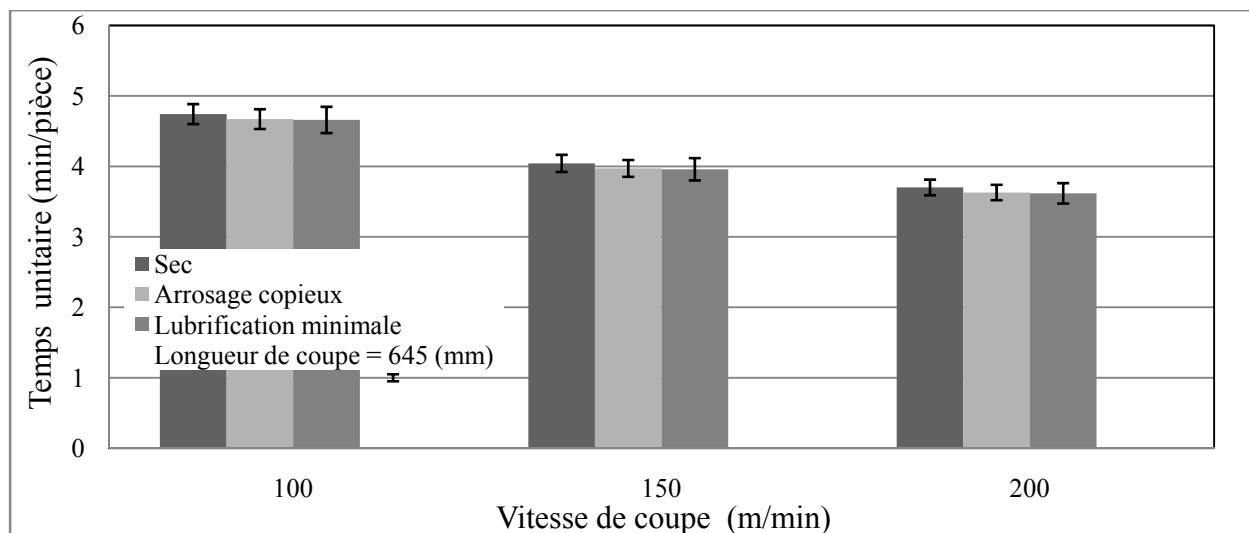


Figure 6.2 : Temps unitaire pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage.

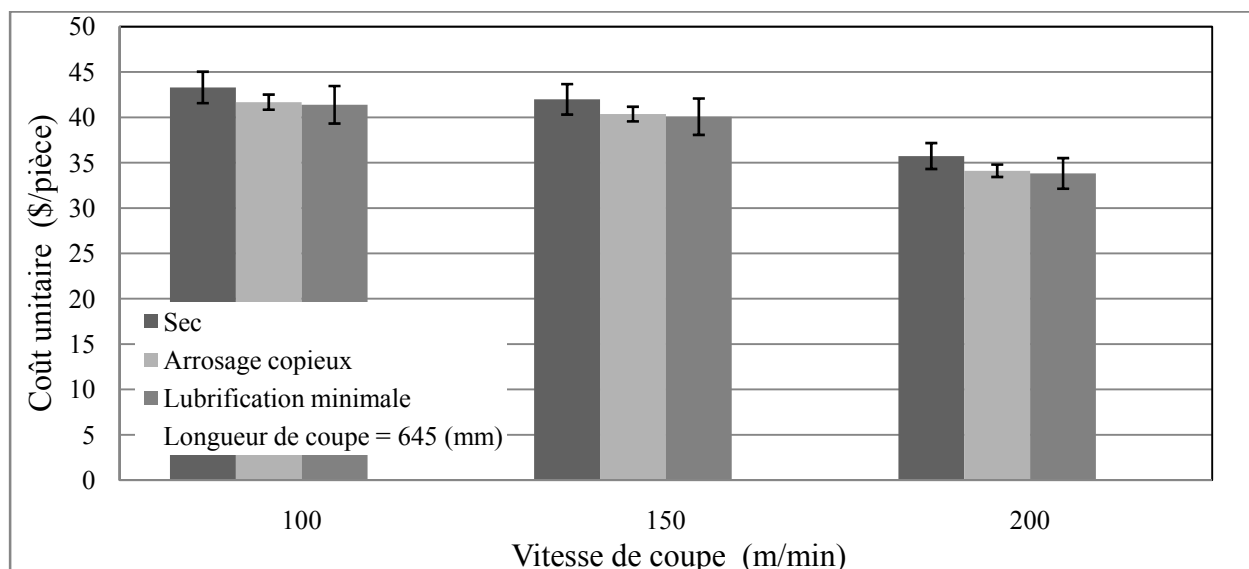


Figure 6.3 : Coût unitaire pour différentes vitesse de coupe en fonction du mode d'arrosage.

2. L'influence de la vitesse de coupe sur le temps unitaire est plus forte que celle du changement de mode de lubrification. Une augmentation de la vitesse de coupe de 50 (m/min) produit une diminution du temps unitaire de 8.5 % en moyenne. Alors qu'un changement de mode de lubrification (de sec à l'arrosage copieux) produit une diminution du temps unitaire de 0.8 % en moyenne, la figure 6.4 montre cette différence. Pour définir les raisons de cette différence, il faut étudier les variations des éléments de la formule (6.5). Dans cette formule, tous les éléments sont constants ou presque, sauf deux éléments : le temps technologique et la durée de vie de l'outil. Leurs variations

doivent être étudiées : a) chaque augmentation de la vitesse de coupe de 50 (m/min) diminue le temps technologique de 33 % alors que le changement du mode de lubrification ne change pas le temps technologique; b) nous avons vu au chapitre 5 que le pourcentage de la contribution de la vitesse de coupe à la variabilité de la durée de vie de l'outil est de 53 % et celui du mode de lubrification est de 36 % (les raisons de ces distributions sont présentées dans le chapitre 5). La combinaison des effets de la vitesse de coupe et du mode de lubrification sur les deux éléments en question explique la forte influence de la vitesse de coupe sur le temps unitaire.

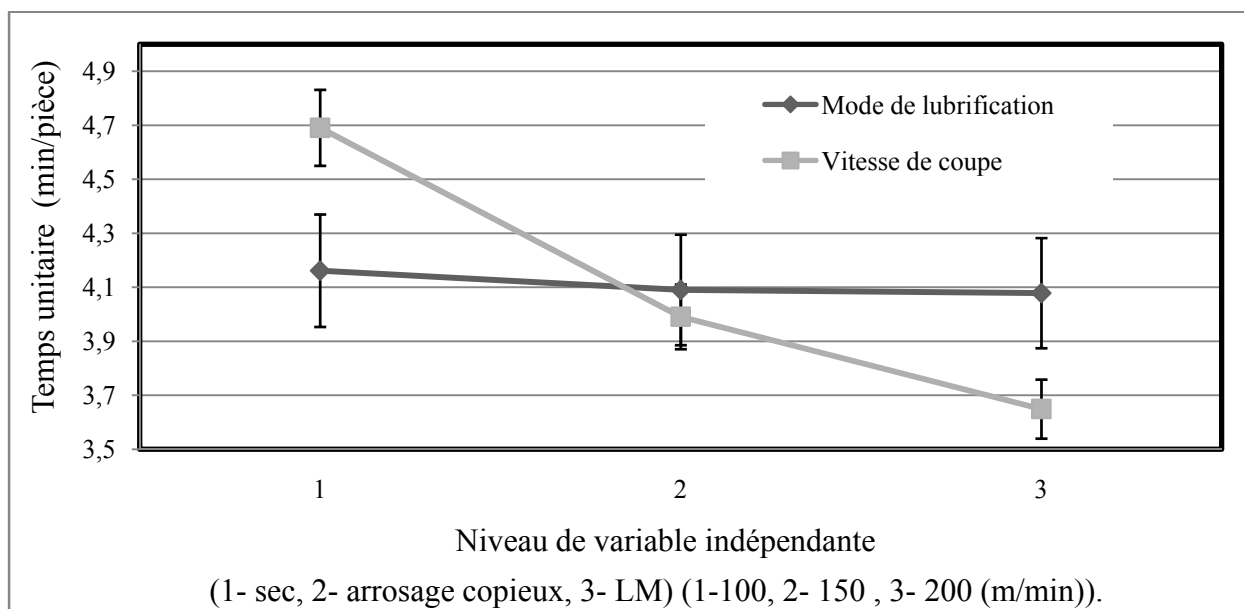


Figure 6.4 : Moyenne du temps unitaire pour chaque niveau de VI.

3. La vitesse de coupe et le mode de lubrification ont des influences remarquables sur le coût unitaire. Une augmentation de la vitesse de coupe de 50 (m/min) diminue en moyenne le coût unitaire de 19.3 %. Le changement de mode de lubrification (du sec à l'arrosage copieux ou de l'arrosage copieux à la LM) diminue en moyenne le coût unitaire de 4.9 %. La figure 6.5 montre cette différence. Nous constatons que cette différence est plus prononcée dans l'intervalle de vitesse 150 (m/min) à 200 (m/min). L'existence de cette différence peut s'expliquer par trois raisons déjà présentées pour les items 1, 2 de cette section.

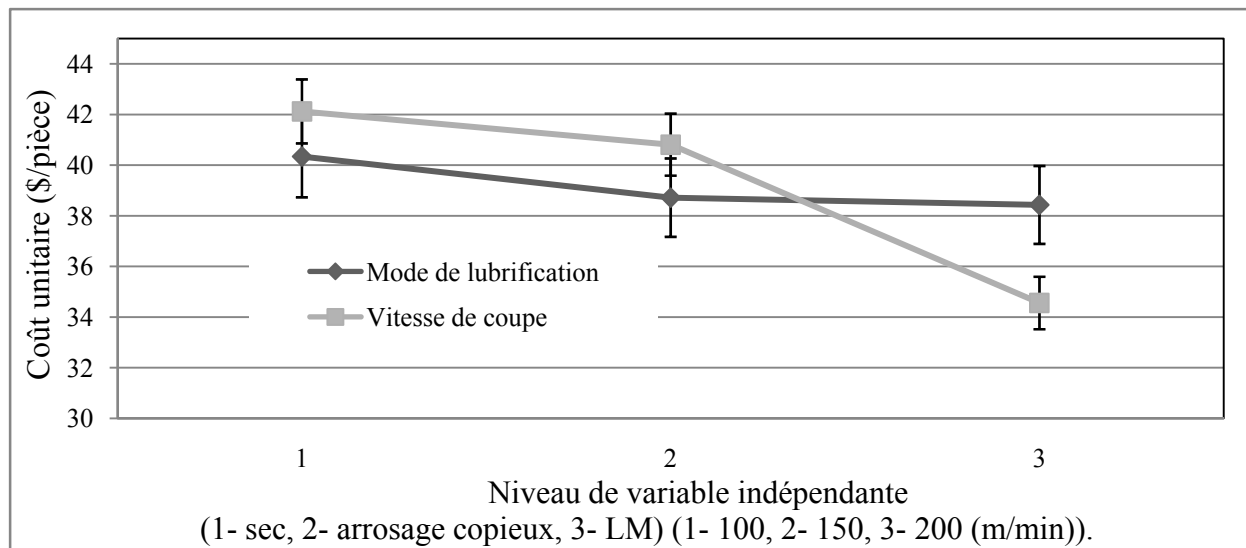


Figure 6.5 : Moyenne du temps unitaire pour chaque niveau de VI.

Pour avoir plus de précisions sur les effets des modes d'arrosage sur le temps et le coût unitaire, nous utilisons une nouvelle fois le plan Taguchi. Toutes les données du plan d'expérience sont les mêmes que le plan d'expérience précédent sauf les variables dépendantes. Le temps et le coût unitaire sont les VD du nouveau plan d'expérience et les résultats d'analyse sont :

Tableau 6.7 : Définition des VI qui ont l'influence significative sur variation de VD

Variable dépendante	Sources de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Variation de chaque effet	Nombre de Fisher calculé	Nombre de Fisher standard	Influence significative
Temps unitaire (min/pièce)	Mode de lubrification	2	0.03635	0.018	46.61	3.44	Oui
	Vitesse de coupe	2	5.0728	2.54	6504.37	3.44	Oui
	Variables résiduelles	22	0.0086	0.0004		3.44	
Total		27	5.1178				
Coût unitaire (\$/pièce)	Mode de lubrification	2	19.171	9.59	42.86	3.44	Oui
	Vitesse de coupe	2	294.346	147.17	658.07	3.44	Oui
	Variables résiduelles	22	4.9202	0.22		3.44	
Total		27	318.437				

Nous constatons que la vitesse de coupe et le mode de lubrification ont une influence significative sur le temps et le coût unitaire. Le tableau 6.8 montre le pourcentage de la contribution de chacune des VI dans la variabilité de chacune de VD.

Tableau 6.8 : Pourcentage de variation attribuable à chaque source de variation

Variable dépendante	Sources de variation	Degrés de liberté	Somme des carrés	Variation de chaque effet	Nombre de Fisher calculé	Somme des carrés absolue	Pourcentage de contribution (%)
Temps unitaire (min/pièce)	Mode de lubrification	2	0.03635	0.19	42.76	0.04	6.95
	Vitesse de coupe	2	5.0728	0.28	62.06	5.07	89.58
	Variables résiduelles	22	0.0086	0.004		0.01	3.47
Total		27	5.1178				
Coût unitaire (\$/pièce)	Mode de lubrification	2	19.171	540.18	44.03	18.72	17.65
	Vitesse de coupe	2	294.346	553.47	45.11	293.9	73.29
	Variables résiduelles	22	4.9202	12.27		5.81	9.06
Total		27	318.437				

Les données des tableaux 6.7 et 6.8 montrent que la vitesse de coupe et le mode de lubrification ont des influences significatives sur le temps et le coût unitaire. Le facteur le plus important est la vitesse de coupe avec 89.58 % de contribution à la variabilité du temps unitaire et 73.29 % de contribution à la variabilité du coût unitaire. Le mode de lubrification a un second niveau d'importance et produit respectivement 6.95 % et 17.65 % de la variabilité des variables dépendantes. Les différences entre les pourcentages de contribution des VI aux variabilités des VD peuvent être expliquées et confirmées en considérant les explications déjà présentées pour les figures 6.4 et 6.5. Ces différences montrent que le facteur de contrôle pour les deux VD est la vitesse de coupe et que le mode de lubrification peut être utilisé pour l'optimisation du processus d'usinage. Les variables résiduelles sont au troisième niveau de contribution à la variabilité des VD. Leurs contributions aux variabilités des VD sont de 3.47 % et de 9.06 %. Celles-ci montrent qu'il y a : a) une très faible probabilité pour avoir une ou plusieurs variables pas ou mal maîtrisées pendant les essais; b) une faible probabilité que les conditions expérimentales n'aient pas été suffisamment contrôlées; c) une faible probabilité d'avoir des erreurs au cours des mesures et estimations des VD; d) aucune probabilité qu'une variable importante ait été omise du plan d'expérience ou qu'elle n'ait pas été maîtrisée pendant l'usinage.



En sachant que le processus d'optimisation ne trouve que les conditions optimales dans les domaines avec intervalles déjà déterminés, chaque changement des conditions ou des intervalles peut changer la réponse optimale.

## 6.6 Conclusion

Selon les analyses que nous avons faites au cours du processus d'optimisation, dans les domaines d'intérêts et les intervalles déterminés de notre expérience, nous pouvons conclure que la vitesse de coupe et le mode de lubrification ont des influences significatives sur le temps et le coût unitaire. L'influence de la vitesse de coupe sur la variabilité du temps et du coût unitaire est plus importante que celui du mode de lubrification. Pour chaque vitesse de coupe, la lubrification minimale produit le temps et le coût unitaire minimal. L'arrosage améliore toujours la performance de coupe par rapport à l'usinage à sec.

Les critères de la performance de coupe (la durée de vie de l'outil, l'effort de coupe et la rugosité de la surface) doivent être vérifiés une nouvelle fois afin de déterminer si leurs variabilités ont des influences significatives sur la performance de coupe. Au cours de l'optimisation, nous constatons que la rugosité de la surface usinée n'a aucune influence sur le temps et le coût unitaire. Ce phénomène est très important afin de comprendre que :

1. La rugosité de la surface de coupe usinée et la durée de vie de l'outil ne doivent pas être considérées simultanément comme critère pour déterminer la performance d'usinage. Il faut considérer la rugosité de la surface comme une variable dominante sur la détermination de la durée de vie de l'outil de coupe.
2. En général, au moment du choix des variables indépendantes, il faut être très prudent parce qu'il y a une possibilité de choisir des variables qui sont fortement dépendantes. Cela est dispendieux en temps et augmente le coût de nos expériences sans avoir produit des résultats significatifs.

La performance de notre processus, le fraisage d'une pièce de CsMAIPA-SiC (GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>), peut être améliorée en utilisant un fluide de coupe, la meilleure performance se produit sous la lubrification minimale. La durée de vie de l'outil et l'effort de coupe sont les deux critères de la performance de coupe qui ont des influences significatives sur le coût unitaire. Afin d'optimiser le coût unitaire, le critère de la durée de vie de l'outil est plus important que l'effort de coupe. En

pratique pour notre processus, sans modifier fortement les conditions de l'usinage, on peut simplifier le processus d'optimisation. Cela est possible en considérant les influences de la vitesse de coupe et du mode de lubrification sur le critère de la durée de vie de l'outil.

À la fin, nous pouvons confirmer que la LM produit la meilleure performance pour notre processus avec toutes ses conditions, son domaine d'intérêt, ses intervalles de validation.

Les futures recherches ou futures travaux dans ce domaine peuvent être réalisés afin :

1. D'améliorer la méthode d'optimisation : dans le cadre de notre recherche, nous avons considéré qu'il y a une relation linéaire entre les variables indépendantes et les variables dépendantes. En réalité, le processus d'usinage et ses variables sont très complexes et non linéaires.
2. D'augmenter la précision d'optimisation. À cause des raisons déjà présentées, nous n'avons pas considéré les interactions entre les variables indépendantes. Dans la section de visualisation et de discussion du chapitre 5, ainsi que dans quelques paragraphes ci-dessus, nous avons constaté qu'il y a des interactions et des relations très fortes entre les variables considérées. Ce problème peut augmenter la variance de nos VD et par conséquent, diminuer la précision des résultats.
3. De généraliser les résultats trouvés : développer un banc d'essais qui servira à démontrer l'influence du mode de lubrification sur les différents critères de la performance d'usinage d'une pièce en CsMAIPA-SiC. Analyser les données afin de trouver des formules ou des relations plus générales que nos résultats et par conséquent plus pratiques.

## CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons présenté nos travaux sur l'optimisation de l'usinage des CsMM à matrice d'aluminium renforcés de particules de carbure de silicium et de graphite revêtus de nickel (GrA-Ni 10S.4G®). Le travail développé concerne l'optimisation du processus de coupe par la performance d'usinage en considérant les conditions de coupe mécanique et environnementale (mode d'arrosage).

Pour optimiser la performance d'usinage, nous avons réalisé un plan d'expérience selon la méthode Taguchi. Nous avons choisi trois critères (variables dépendantes) pour la performance de coupe : la durée de vie de l'outil, l'effort de coupe et la rugosité de la surface usinée; deux variables indépendantes : la vitesse de coupe et le mode de lubrification. Au cours d'une étude préliminaire, nous avons trouvé les variances des variables dépendantes. Ensuite, nous avons déterminé le nombre de répétitions nécessaires. Puis, nous avons réalisé les essais. L'analyse de ces derniers fait ressortir plusieurs interprétations détaillées ci-dessous en trois catégories :

### **Relation entre les variables dépendantes et indépendantes**

1. La durée de vie de l'outil est dépendante des deux variables indépendantes. L'influence de la vitesse sur la durée de vie de l'outil est plus forte que celle du mode de lubrification. Une augmentation de la vitesse de coupe diminue la durée de vie de l'outil et dans tous les cas, l'utilisation de fluide de coupe prolonge la durée de vie de l'outil. La meilleure durée de vie de l'outil se produit sous la lubrification minimale. Avec l'augmentation de la vitesse de coupe, l'influence du fluide de coupe sur la durée de vie de l'outil diminue.
2. L'effort de coupe est affecté dans les mêmes proportions par les deux variables indépendantes. Une augmentation de la vitesse de coupe diminue l'effort de coupe alors que l'utilisation du fluide de coupe pendant l'usinage augmente l'effort de coupe. Il n'y a aucune interaction entre les deux variables indépendantes.
3. La rugosité de la surface usinée est plus affectée par le mode d'arrosage que par la vitesse de coupe. Une augmentation de la vitesse de coupe diminue, de la même manière que l'utilisation du fluide de coupe, la rugosité de la surface. Donc, la meilleure surface usinée se produit à la vitesse de coupe maximum et sous la lubrification minimale.

### **Relation entre les variables dépendantes et la performance de coupe**

1. La performance d'usinage est fonction de la durée de vie de l'outil et de l'effort de coupe.
2. La durée de vie de l'outil affecte fortement la performance d'usinage. Une durée de vie prolongée produit le temps et le coût unitaire le plus faible.
3. L'effort de coupe affecte légèrement la performance d'usinage. L'augmentation de l'effort de coupe augmente le coût unitaire.
4. La rugosité de la surface, selon les conditions de notre expérience, n'affecte pas la performance de coupe.

### **Relation entre les variables indépendantes et la performance de coupe**

1. La vitesse de coupe et le mode de lubrification ont des influences remarquables sur la performance d'usinage (temps et coût unitaire de production). Une augmentation de la vitesse de coupe de 50 (m/min) diminue en moyenne le coût unitaire de 19.3 %. Le changement de mode de lubrification (du sec à l'arrosage copieux ou de l'arrosage copieux à la LM) diminue en moyenne le coût unitaire de 4.9 %.
2. La LM a une influence considérable sur la performance d'usinage. L'usinage sous la LM pour chaque vitesse de coupe produit le temps et le coût unitaire minimum. L'arrosage copieux a une influence inférieure à la LM sur la prolongation de la durée de vie de l'outil. Elle est également plus dispendieuse à cause de l'utilisation d'une grande quantité de fluide de coupe et de l'augmentation de l'énergie consommée. Donc, l'usinage sous l'arrosage copieux peut être un choix de deuxième rang d'un point de vue économique. L'usinage à sec produit toujours le temps et le coût unitaire le plus élevé par rapport aux deux modes d'arrosage. L'influence de l'arrosage (les deux modes) sur la performance d'usinage diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe.
3. Une augmentation de la vitesse de coupe produit une diminution du temps unitaire et en même temps une forte augmentation du coût unitaire. L'influence de la vitesse de coupe sur le temps et le coût unitaire est plus importante aux vitesses plus élevées.

Les résultats, de la recherche effectuée, présentés dans ce mémoire, ont permis de mettre en place un laboratoire "usinage écologique" présenté depuis l'hiver 2009. Ce laboratoire permet aux

étudiants d'acquérir des connaissances sur l'usinage des matériaux composites métalliques, plus particulièrement sur le GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup>. Il a permis de transmettre également, une méthode d'optimisation d'usinage utilisable en industrie.

La recherche effectuée confirme l'influence positive de l'utilisation de la lubrification minimale sur la performance de coupe. Cependant, d'autres aspects restent à explorer :

La confirmation des tendances observées lors de nos essais pour des vitesses plus élevées (supérieure à 200m/min);

Les causes de l'augmentation de l'effort de coupe pour l'usinage du GrA-Ni 10S.4G<sup>®</sup> sous arrosage et lubrification minimale doivent être confirmées;

La prise en compte de variables indépendantes supplémentaires pour modéliser et optimiser le processus d'usinage de manière plus complète.

La réalisation des essais avec un outil et des plaquettes utilisés dans les situations industrielles permettrait d'avoir un résultat plus proche de la réalité industrielle.

## RÉFÉRENCES

- [1] C. R. Dandekar et Y. C. Shin, "Multi-step 3-D finite element modeling of subsurface damage in machining particulate reinforced metal matrix composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 8, pp. 1231-1239, 2009.
- [2] A. Kremer, A. Devillez, S. Dominiak, D. Dudzinski, et M. El Mansori, "Machinability of Al/SiC particulate metal-matrix composites under dry conditions with CVD diamond-coated carbide tools," *Machining Science and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 214-33, 2008.
- [3] L. Krishnamurthy, B. K. Sridhara, et D. A. Budan, "Comparative study on the machinability aspects of aluminium silicon carbide and aluminium graphite composites," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 22, no. 7, pp. 903-908, 2007.
- [4] E. Kilickap, O. Cakir, M. Aksoy, et A. Inan, "Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164-165, pp. 862-7, 2005.
- [5] M. K. Surappa, "Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities," *Sadhana*, vol. 28, pp. 319-34, 2003.
- [6] J. A. E. Bell et T. F. Stephenson, "Opportunities for new graphitic aluminium metal matrix composite," *Materials Science and Technology*, vol. 14, no. 9-10, pp. 843-50, 1998.
- [7] P. S. Sreejith, "Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions" *Materials Letters*, vol. 62, no. 2, pp. 276-278, 2008.

- [8] K. Weinert, I. Inasaki, J. W. Sutherland, et T. Wakabayashi, "Dry machining and minimum quantity lubrication," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 511-537, 2004.
- [9] C.-H. Wu et C.-H. Chien, "Influence of lubrication type and process conditions on milling performance," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, no. 5, pp. 835-843, 2007.
- [10] M. Bacci da Silva et J. Wallbank, "Cutting temperature: prediction and measurement methods--a review," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 88, no. 1-3, pp. 195-202, 1999.
- [11] E. M. Trent, "Metal cutting and the tribology of seizure: II. Movement of work material over the tool in metal cutting," *Wear*, vol. 128, no. 1, pp. 47-64, 1988.
- [12] E. M. Trent, "Metal cutting and the tribology of seizure: III. Temperatures in metal cutting," *Wear*, vol. 128, no. 1, pp. 65-81, 1988.
- [13] N. A. Abukhshim, P. T. Mativenga, et M. A. Sheikh, "Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 7-8, pp. 782-800, 2006.
- [14] N. A. Abukhshim, P. T. Mativenga, et M. A. Sheikh, "Investigation of heat partition in high speed turning of high strength alloy steel," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, no. 15, pp. 1687-95, 2005.

- [15] U. A. Dabade, D. Dapkekar, et S. S. Joshi, "Modeling of chip-tool interface friction to predict cutting forces in machining of Al/SiCp composites," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 9, pp. 690-700, 2009.
- [16] N. R. Dhar et M. Kamruzzaman, "Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 47, no. 5, pp. 754-9, 2007.
- [17] A. O. Tay et M. G. Stevenson, "Using the finite element method to determine temperature distributions in orthogonal machining," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (London)*, vol. 188, no. 55, pp. 627-638, 1974.
- [18] A. Herchang et W.-J. Yang, "Heat transfer and life of metal cutting tools in turning" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 41, no. 3, pp. 613-623, 1998.
- [19] M. Balazinski, "note de cours MEC4530", Montréal, 2009, pp. 1-100.
- [20] K. M. Vernaza-Pena, J. J. Mason, et M. Li, "Experimental study of the temperature field generated during orthogonal machining of an aluminum alloy," *Experimental Mechanics*, vol. 42, no. 2, pp. 221-229, 2002.
- [21] I. Lazoglu et Y. Altintas, "Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 9, pp. 1011-1022, 2002.



- [22] X. L. Liu, D. H. Wen, Z. J. Li, L. Xiao, et F. G. Yan, "Cutting temperature and tool wear of hard turning hardened bearing steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, no. 1-3, pp. 200-206, 2002.
- [23] I. Korkut, M. Boy, I. Karacan, et U. Seker, "Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters," *Materials and Design*, vol. 28, no. 8, pp. 2329-2335, 2007.
- [24] R. Komanduri et Z. B. Hou, "Unified approach and interactive program for thermal analysis of various manufacturing processes with application to machining," *Machining Science and Technology: An International Journal*, vol. 13, no. 2, pp. 143-176, 2009.
- [25] F. E. Kennedy, Jr., "Thermal and thermomechanical effects in dry sliding," *Wear*, vol. 100, pp. 453-76, 1984.
- [26] W. Grzesik, "Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 39, no. 3, pp. 355-369, 1999.
- [27] R. Komanduri et Z. B. Hou, "Analysis of heat partition and temperature distribution in sliding systems," *Wear*, vol. 250-251, no. 2, pp. 925-938, 2001.
- [28] Rodr, R. guez-Baracaldo, J. A. Benito, E. S. Puchi-Cabrera, et M. H. Staia, "High temperature wear resistance of (TiAl) N PVD coating on untreated and gas nitrided AISI H13 steel with different heat treatments," *Wear*, vol. 262, no. 3-4, pp. 380-389, 2007.

- [29] M. H. Staia, M. D'Alessandria, D. T. Quinto, F. Roudet, et M. M. Astort, "High-temperature tribological characterization of commercial TiAlN coatings," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 18, no. 32, pp. S1727-36, 2006.
- [30] G. Liu, G. Tan, et G. Li, "Experiment, modeling, and analysis for temperature field of milling insert," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, no. 1-2, pp. 67-73, 2009.
- [31] N. Sugita, T. Osa, et M. Mitsuishi, "Analysis and estimation of cutting-temperature distribution during end milling in relation to orthopedic surgery," *Medical Engineering and Physics*, vol. 31, no. 1, pp. 101-107, 2009.
- [32] T. Ueda, A. Hosokawa, K. Oda, et K. Yamada, "Temperature on flank face of cutting tool in high speed milling," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 50, no. 1, pp. 37-40, 2001.
- [33] "Metalworking Fluids: Safety and Health Best Practices Manual," 1999. [En ligne]. Disponible: [http://www.osha.gov/SLTC/metalworkingfluids/metalworkingfluids\\_manual.html](http://www.osha.gov/SLTC/metalworkingfluids/metalworkingfluids_manual.html). [Consulté le .]
- [34] M. A. El Baradie, "Cutting fluids: Part I. Characterisation," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 56, no. 1-4, pp. 786-797, 1996.
- [35] M. Stanford et P. M. Lister, "The future role of metalworking fluids in metal cutting operations," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 54, no. 1, pp. 11-19, 2002.
- [36] J. P. Byers, *Metalworking Fluids*, second<sup>e</sup> éd.: Taylor & Francis group, 2006.

- [37] D. M. Haan, S. A. Batzer, W. W. Olson, et J. W. Sutherland, "Experimental study of cutting fluid effects in drilling," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 305-313, 1997.
- [38] D. W. Kim, Y. S. Lee, M. S. Park, et C. N. Chu, "Tool life improvement by peck drilling and thrust force monitoring during deep-micro-hole drilling of steel," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 3-4, pp. 246-255, 2009.
- [39] K. H. W. Seah, X. Li, et K. S. Lee, "Effect of applying coolant on tool wear in metal machining," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 48, no. 1-4, pp. 495-501, 1995.
- [40] R. Shetty, R. Pai, V. Kamath, et S. S. Rao, "Steam as coolant and lubricant in turning of metal matrix composites," *Journal of Zhejiang University: Science A*, vol. 9, no. 9, pp. 1245-1250, 2008.
- [41] "Stay cool with the right stuff [cutting fluid selection for machine tool]," *Metalworking Production*, vol. 148, no. 13, pp. 31-2, 2004.
- [42] I. Zaghbani, V. Songmene, et R. Khettabi, "Fine and ultrafine particle characterization and modeling in high-speed milling of 6061-T6 aluminum alloy," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 18, no. 1, pp. 38-48, 2009.
- [43] J. P. Byers, "Selecting the 'perfect' metalworking fluid," *Tribology & Lubrication Technology*, vol. 65, no. 3, pp. 29-33, 35-6, 2009.

- [44] B. Balout, V. Songmene, et J. Masounave, "An experimental study of dust generation during dry drilling of pre-cooled and pre-heated workpiece materials," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 9, no. 1, pp. 23-34, 2007.
- [45] J. Sun, C. Ju, D. J. Michalek, et J. W. Sutherland, "Evaporation and settling behavior of metalworking fluid aerosols," *Particulate Science and Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 245-262, 2009.
- [46] R. Khettabi, V. Songmene, et J. Masounave, "Effect of tool lead angle and chip formation mode on dust emission in dry cutting," *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 194, no. 1-3, pp. 100-9, 2007.
- [47] D. P. Adler, W. W. S. Hii, D. J. Michalek, et J. W. Sutherland, "Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns," *Machining Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 23-58, 2006.
- [48] J. W. Sutherland, V. N. Kulur, et N. C. King, "Experimental investigation of air quality in wet and dry turning," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 61-64, 2000.
- [49] K. Sutherland, "Machinery and processing: Managing cutting fluids used in metal working," *Filtration & Separation*, vol. 45, no. 7, pp. 20-23, 2008.
- [50] E. Brinksmeier, D. A. Lucca, et A. Walter, "Chemical aspects of machining processes," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 685-699, 2004.

- [51] "Cutting fluid management small machining operations," *IOWA WASTE REDUCTION CENTER (University of Northern Iowa)* 2003. [En ligne]. Disponible: <http://www.iwrc.org/downloads/pdf/cuttingFluid03.pdf> [Consulté le.10.10.2009]
  
- [52] A. E. D. Wisley Falco Sales, Álisson Rocha Machado "Application of Cutting Fluids in Machining Processes," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, vol. 23 Rio de Janeiro, no. 2, 2001.
  
- [53] G. Foltz, "Manage fluids to fight corrosion," *Tooling & Production*, vol. 69, no. 1, pp. 38-9, 2003.
  
- [54] G. Boothroyd et W. A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3<sup>e</sup> éd.: CRC Taylor & Francis, 2006.
  
- [55] L. R. Rudnick, *Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants : chemistry and technology* 1<sup>e</sup> éd.: CRC Taylor & Francis, 2006.
  
- [56] "Prévention de la pollution dans le sous-secteur de l'usinage des métaux," pp. 13, 2005. [En ligne]. Disponible: [http://www.cprac.org/fr/03\\_activitats\\_estudis\\_03.htm#8](http://www.cprac.org/fr/03_activitats_estudis_03.htm#8). [Consulté le.08.05.2009]
  
- [57] L. De Chiffre et W. Belluco, "Investigations of cutting fluid performance using different machining operations," *Lubrication Engineering*, vol. 58, no. 10, pp. 22-29, 2002.
  
- [58] M. A. Xavier et M. Adithan, "Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 2, pp. 900-909, 2009.

- [59] D. P. Upton, "Optimization of cutting fluid performance," *International Journal of Production Research*, vol. 38, no. 5, pp. 1219-1223, 2000.
- [60] X. P. Li et K. H. W. Seah, "A pressured air jet approach to tool wear minimization in cutting of metal matrix composites," *Wear*, vol. 255, no. 7-12, pp. 1352-1358, 2003.
- [61] D. A. Stephenson et J. S. Agapiou, *Metal Cutting Theory and Practice*, 2<sup>e</sup> éd.: CRC Taylor & Francis, 2006.
- [62] T. Thepsonthi, M. Hamdi, et K. Mitsui, "Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 2, pp. 156-162, 2009.
- [63] J. L. Collett Jr et S. N. Pandis, "The influence of drop size-dependent fog chemistry on aerosol processing by San Joaquin Valley fogs," *Atmospheric Environment*, vol. 33, no. 29, pp. 4817-4832, 1999.
- [64] P. H. Marmottant et E. Villermaux, "On spray formation," *Cambridge University Press*, vol. 498, pp. 73-111, 2004.
- [65] E. E. Fel'dshtein et R. Maruda, "Some regularities of the heat transfer in the process of cooling of a cutting zone by an emulsion fog," *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 79, no. 3, pp. 606-610, 2006.

- [66] V. S. Sharma, M. Dogra, et N. M. Suri, "Advances in the turning process for productivity improvement - a review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture)*, vol. 222, no. B11, pp. 1417-42, 2008.
- [67] V. Marinov, "Cutting fluids," vol. 08-12-2009, 2009. [En ligne]. Disponible: [http://me.emu.edu.tr/me364/ME364\\_cutting\\_fluids.pdf](http://me.emu.edu.tr/me364/ME364_cutting_fluids.pdf). [Consulté le 15.01.2010].
- [68] E. O. Ezugwu, "Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 12-13, pp. 1353-1367, 2005.
- [69] G. Byrne, D. Dornfeld, et B. Denkena, "Advancing cutting technology," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 483-507, 2003.
- [70] A. D. Jayal et A. K. Balaji, "Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: Interactions with tool-coatings and tool surface features," *Wear*, vol. 267, no. 9-10, pp. 1723-1730, 2009.
- [71] F. Klocke et G. Eisenblaetter, "Dry cutting," *Annals of the CIRP*, vol. 46, no. 2, pp. 519-526, 1997.
- [72] D. Mukhopadhyay, S. Banerjee, et N. S. K. Reddy, "Investigation to study the applicability of solid lubricant in turning AISI 1040 steel," *Transactions of the ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 129, no. 3, pp. 520-6, 2007.
- [73] C. J. Beall, "Solid film lubricants," *Metal Finishing*, vol. 99, no. Supplement 1, pp. 510-513, 2001.

- [74] D. Nageswara Rao et P. Vamsi Krishna, "The influence of solid lubricant particle size on machining parameters in turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 1, pp. 107-111, 2008.
- [75] D. Rao, P. Krishna, et R. Srikant, "Surface model and tool-wear prediction model for solid lubricant-assisted turning," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 222, no. 5, pp. 657-665, 2008.
- [76] V. S. Sharma, M. Dogra, et N. M. Suri, "Cooling techniques for improved productivity in turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 6, pp. 435-453, 2009.
- [77] N. Suresh Kumar Reddy et P. Venkateswara Rao, "Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 2, pp. 189-198, 2006.
- [78] N. S. K. Reddy et P. V. Rao, "Performance improvement of end milling using graphite as a solid lubricant," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 20, no. 4, pp. 673-686, 2005.
- [79] S. Lei, S. Devarajan, et Z. Chang, "A study of micropool lubricated cutting tool in machining of mild steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 3, pp. 1612-1620, 2009.
- [80] P. Vamsi Krishna et D. Nageswara Rao, "Performance evaluation of solid lubricants in terms of machining parameters in turning," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 48, no. 10, pp. 1131-7, 2008.



- [81] V. Songmene et M. Balazinski, "Machinability of graphitic metal matrix composites as a function of reinforcing particles," *Annals of the CIRP*, vol. 48, no. 1, pp. 77-80, 1999.
- [82] J. Dosbaeva, G. Fox-Rabinovich, J. Dasch, et S. Veldhuis, "Enhancement of wet- and MQL-based machining of automotive alloys using cutting tools with DLC/polymer surface treatments," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 17, no. 3, pp. 346-351, 2008.
- [83] T.-k. Cao, W. Gao, et X.-n. Wang, "Study on cutting performance and wearing mechanism of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC/CaF<sub>2</sub> self-lubricating ceramic tool," *Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, vol. 29, no. 2, pp. 150-3, 2008.
- [84] J. Deng, W. Song, et H. Zhang, "Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 49, no. 1, pp. 66-72, 2009.
- [85] S. Y. Hong, "Economical and Ecological Cryogenic Machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 123, no. 2, pp. 331-338, 2001.
- [86] Y. Yildiz et M. Nalbant, "A review of cryogenic cooling in machining processes," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 48, no. 9, pp. 947-64, 2008.
- [87] K. V. B. S. Kalyan Kumar et S. K. Choudhury, "Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments," *Journal of materials processing technology*, vol. 203, no. 1-3, pp. 95-101, 2008.

- [88] C. Evans, "Cryogenic diamond turning of stainless steel," in *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 40, CIRP Annals, Ed.^Eds., 1 ed. Palo Alto, CA, USA: Publ by Int Inst for Production Engineering Research, 1991, pp. 571-575.
- [89] S. Y. Hong et Y. Ding, "Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 41, no. 10, pp. 1417-1437, 2001.
- [90] Z. Y. Wang et K. P. Rajurkar, "Cryogenic machining of hard-to-cut materials," *Wear*, vol. 239, no. 2, pp. 168-175, 2000.
- [91] Z. Y. Wang et K. P. Rajurkar, "Wear of CBN tool in turning of silicon nitride with cryogenic cooling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 37, no. 3, pp. 319-326, 1997.
- [92] Z. Y. Wang, K. P. Rajurkar, et M. Murugappan, "Cryogenic PCBN turning of ceramic (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)," *Wear*, vol. 195, no. 1-2, pp. 1-6, 1996.
- [93] M. I. Ahmed, A. F. Ismail, Y. A. Abakr, et A. K. M. N. Amin, "Effectiveness of cryogenic machining with modified tool holder," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, no. 1-3, pp. 91-6, 2007.
- [94] D. Mohan Lal, S. Renganarayanan, et A. Kalanidhi, "Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels," *Cryogenics*, vol. 41, no. 3, pp. 149-155, 2001.
- [95] K. P. Maity et P. K. Swain, "An experimental investigation of hot-machining to predict tool life," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, no. 1-3, pp. 344-349, 2008.

- [96] R. C. Dewes, E. Ng, K. S. Chua, P. G. Newton, et D. K. Aspinwall, "Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 92-93, pp. 293-301, 1999.
- [97] J. M. Longbottom et J. D. Lanham, "A review of research related to Salomon's hypothesis on cutting speeds and temperatures," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 14, pp. 1740-1747, 2006.
- [98] D. G. Thakur, B. Ramamoorthy, et L. Vijayaraghavan, "Machinability investigation of Inconel 718 in high-speed turning," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 45, no. 5-6, pp. 421-429, 2009.
- [99] G. Boothroyd. et W. A. Knight., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 3<sup>e</sup> éd.: CRC Taylor & Francis, 2006.
- [100] R. T. Coelho, S. Yamada, D. K. Aspinwall, et M. L. H. Wise, "The application of polycrystalline diamond (PCD) tool materials when drilling and reaming aluminium based alloys including MMC," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 35, no. 5, pp. 761-774, 1995.
- [101] F. Klocke, T. Krieg, K. Gerschwiler, R. Fritsch, V. Zinkann, M. Poehls, et G. Eisenblaetter, "Improved cutting processes with adapted coating systems," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 47, no. 1, pp. 65-68, 1998.

- [102] W. Grzesik et P. Nieslony, "Prediction of friction and heat flow in machining incorporating thermophysical properties of the coating-chip interface," *Wear*, vol. 256, no. 1-2, pp. 108-117, 2004.
- [103] T. H. C. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, et Y. Yamane, *Metal Machining - Theory and Applications*, 2000. Disponible:  
[http://www.knovel.com/web/portal/knovel\\_content?p\\_p\\_id=EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT&p\\_p\\_action=1&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_struts\\_action=/ext/knovel\\_content/view&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_contentType=2&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_SpaceID=0&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_VerticalID=0&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_SetID=9215153&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_BookID=435&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_NodeID=456094&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_Associated=false&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_SearchMode=true&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_advancedSearch=false&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_searchTermA1=cutting+tool+design&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_subjectAreaID=-2&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_subSubjectAreaID=0&\\_EXT\\_KNOVEL\\_CONTENT\\_IsSearch=true](http://www.knovel.com/web/portal/knovel_content?p_p_id=EXT_KNOVEL_CONTENT&p_p_action=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_EXT_KNOVEL_CONTENT_struts_action=/ext/knovel_content/view&_EXT_KNOVEL_CONTENT_contentType=2&_EXT_KNOVEL_CONTENT_SpaceID=0&_EXT_KNOVEL_CONTENT_VerticalID=0&_EXT_KNOVEL_CONTENT_SetID=9215153&_EXT_KNOVEL_CONTENT_BookID=435&_EXT_KNOVEL_CONTENT_NodeID=456094&_EXT_KNOVEL_CONTENT_Associated=false&_EXT_KNOVEL_CONTENT_SearchMode=true&_EXT_KNOVEL_CONTENT_advancedSearch=false&_EXT_KNOVEL_CONTENT_searchTermA1=cutting+tool+design&_EXT_KNOVEL_CONTENT_subjectAreaID=-2&_EXT_KNOVEL_CONTENT_subSubjectAreaID=0&_EXT_KNOVEL_CONTENT_IsSearch=true).
- [104] N. Fang et Q. Wu, "The effects of chamfered and honed tool edge geometry in machining of three aluminum alloys," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 10, pp. 1178-1187, 2005.
- [105] V. Dessoly, S. N. Melkote, et C. Lescalier, "Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 44, no. 14, pp. 1463-70, 2004.

- [106] E. O. Ezugwu, "Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, no. 1-3, pp. 60-71, 2007.
- [107] C. Nath et M. Rahman, "Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 9, pp. 965-974, 2008.
- [108] C. Y. Hsu, Y. Y. Lin, W. S. Lee, et S. P. Lo, "Machining characteristics of Inconel 718 using ultrasonic and high temperature-aided cutting," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, no. 1-3, pp. 359-365, 2008.
- [109] S. Bhowmick et A. T. Alpas, "Minimum quantity lubrication drilling of aluminium-silicon alloys in water using diamond-like carbon coated drills," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, no. 12-13, pp. 1429-1443, 2008.
- [110] H. A. Kishawy, M. Dumitrescu, E. G. Ng, et M. A. Elbestawi, "Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 2, pp. 219-27, 2005.
- [111] J. F. Kelly et M. G. Cotterell, "Minimal lubrication machining of aluminium alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 120, no. 1-3, pp. 327-334, 2002.
- [112] D. U. Braga, A. E. Diniz, G. W. A. Miranda, et N. L. Coppini, "Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 122, no. 1, pp. 127-138, 2002.

- [113] O. C. Mendes, R. F. Avila, A. M. Abro, P. Reis, et J. P. Davim, "The performance of cutting fluids when machining aluminium alloys," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 58, no. 5, pp. 260-268, 2006.
- [114] K.-M. Li et S. Y. Liang, "Performance profiling of minimum quantity lubrication in machining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, no. 3-4, pp. 226-233, 2007.
- [115] X. Ding, W. Y. H. Liew, et X. D. Liu, "Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools," *Wear*, vol. 259, no. 7-12, pp. 1225-1234, 2005.
- [116] L. De Chiffre et W. Belluco, "Comparison of methods for cutting fluid performance testing," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 57-60, 2000.
- [117] A. I. Kovalev, D. L. Wainstein, A. Y. Rashkovskiy, G. S. Fox-Rabinovich, K. Yamamoto, S. Veldhuis, M. Aguirre, et B. D. Beake, "Impact of Al and Cr alloying in TiN-based PVD coatings on cutting performance during machining of hard to cut materials," *Vacuum*, vol. 84, no. 1, pp. 184-7, 2009.
- [118] W. Cheng-Hsien et C. Chih-Hsien, "Influence of lubrication type and process conditions on milling performance," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture)*, vol. 221, no. B5, pp. 835-43, 2007.
- [119] L. Kuan-Ming et S. Y. Liang, "Performance profiling of minimum quantity lubrication in machining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, no. 3-4, pp. 226-33, 2007.

- [120] J. P. Davim, "Diamond tool performance in machining metal-matrix composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 128, no. 1-3, pp. 100-105, 2002.
- [121] Y. K. Chou et L. Jie, "CVD diamond tool performance in metal matrix composite machining," *Surface & Coatings Technology*, vol. 200, no. 5-6, pp. 1872-8, 2005.
- [122] P. U. Arumugam, A. P. Malshe, S. A. Batzer, et D. G. Bhat, "Study of airborne dust emission and process performance during dry machining of aluminum-silicon alloy with PCD and CVD diamond coated tools," in *Namrc Xxx, West Lafayette, ID, United states*, 2002.
- [123] E. J. A. Armarego, G. Shi, et S. Verezub, "Modelling the basic cutting action and machining performance of sintered metallic materials," *Machining Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 353-373, 2001.
- [124] M. El-Gallab et M. Sklad, "Machining of Al/SiC particulate metal-matrix composites: Part I: Tool performance," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 83, no. 1-3, pp. 151-158, 1998.
- [125] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, et J. P. Davim, "Some studies in metal matrix composites machining using response surface methodology," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 28, no. 20, pp. 2445-2457, 2009.
- [126] T. Ozben, E. Kilickap, et O. Cakir, "Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, no. 1-3, pp. 220-5, 2008.

- [127] A. Manna et B. Bhattacharayya, "Influence of machining parameters on the machinability of particulate reinforced Al/SiC-MMC," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, no. 9-10, pp. 850-856, 2005.
- [128] M. L. Ted Guo et C. Y. A. Tsao, "Tribological behavior of aluminum/SiC/nickel-coated graphite hybrid composites," *Materials Science and Engineering A*, vol. 333, no. 1-2, pp. 134-145, 2002.
- [129] A. Sakthivel, R. Palaninathan, R. Velmurugan, et P. Raghothama Rao, "Production and mechanical properties of SiC<sub>p</sub> particle-reinforced 2618 aluminum alloy composites," *Journal of Materials Science*, vol. 43, no. 22, pp. 7047-7056, 2008.
- [130] N. Suresh Kumar Reddy, S. Kwang-Sup, et M. Yang, "Experimental study of surface integrity during end milling of Al/SiC particulate metal-matrix composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 201, no. 1-3, pp. 574-579, 2008.
- [131] A. Pramanik, L. C. Zhang, et J. A. Arsecularatne, "Machining of metal matrix composites: effect of ceramic particles on residual stress, surface roughness and chip formation," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 48, no. 15, pp. 1613-25, 2008.
- [132] S. Kannan et H. A. Kishawy, "Tribological aspects of machining aluminium metal matrix composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, no. 1-3, pp. 399-406, 2008.



- [133] U. A. Dabade, S. S. Joshi, R. Balasubramaniam, et V. V. Bhanuprasad, "Surface finish and integrity of machined surfaces on Al/SiCp composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 192-193, pp. 166-174, 2007.
- [134] S. Kannan et H. A. Kishawy, "Surface characteristics of machined aluminium metal matrix composites," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 15, pp. 2017-2025, 2006.
- [135] Kili, E. kap, O. akir, M. Aksoy, et A. Inan, "Study of tool wear and surface roughness in machining of homogenised SiC-p reinforced aluminium metal matrix composite," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 164-165, pp. 862-867, 2005.
- [136] M. S. El-Gallab et M. P. Sklad, "Machining of aluminum/silicon carbide particulate metal matrix composites Part IV. Residual stresses in the machined workpiece," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 152, no. 1, pp. 23-34, 2004.
- [137] Y. Quan et B. Ye, "The effect of machining on the surface properties of SiC/Al composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, no. 1-3, pp. 464-467, 2003.
- [138] C. F. Cheung, K. C. Chan, S. To, et W. B. Lee, "Effect of reinforcement in ultra-precision machining of Al6061/SiC metal matrix composites," *Scripta Materialia*, vol. 47, no. 2, pp. 77-82, 2002.
- [139] M. El-Gallab et M. Sklad, "Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites. Part II: Workpiece surface integrity," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 83, no. 1-3, pp. 277-285, 1998.

- [140] N. Muthukrishnan, M. Murugan, et K. P. Rao, "An investigation on the machinability of Al-SiC metal matrix composites using pcd inserts," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 38, no. 5-6, pp. 447-454, 2008.
- [141] M. A. Maleque et M. R. Karim, "Tribological behavior of dual and triple particle size SiC reinforced Al-MMCs: A comparative study," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 60, no. 4, pp. 189-194, 2008.
- [142] S. Kannan, H. A. Kishawy, et M. Balazinski, "Flank wear progression during machining metal matrix composites," *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 128, no. 3, pp. 787-91, 2006.
- [143] A. Manna et B. Bhattacharayya, "A study on machinability of Al/SiC-MMC," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 140, no. 1-3 SPEC., pp. 711-716, 2003.
- [144] M. El-Gallab et M. Sklad, "Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites. Part III: Comprehensive tool wear models," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 101, no. 1, pp. 10-20, 2000.
- [145] F. Bergman et S. Jacobson, "Tool wear mechanisms in intermittent cutting of metal matrix composites," *Wear*, vol. 179, no. 1-2, pp. 89-93, 1994.
- [146] K. Weinert, "Consideration of tool wear mechanism when machining metal matrix composites (MMC)," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 42, no. 1, pp. 95-98, 1993.

- [147] S. Basavarajappa, "Tool wear in turning of graphitic hybrid metal matrix composites," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 24, no. 4, pp. 484-487, 2009.
- [148] N. Muthukrishnan et J. P. Davim, "Optimization of machining parameters of Al/SiC-MMC with ANOVA and ANN analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 1, pp. 225-32, 2009.
- [149] U. A. Dabade et S. S. Joshi, "Analysis of chip formation mechanism in machining of Al/SiCp metal matrix composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 10, pp. 4704-4710, 2009.
- [150] K. Palanikumar, N. Muthukrishnan, et K. S. Hariprasad, "Surface roughness parameters optimization in machining A356/SiC/20p metal matrix composites by PCD tool using response surface methodology and desirability function," *Machining Science and Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 529-545, 2008.
- [151] N. Muthukrishnan, M. Murugan, et K. Prahlada Rao, "Machinability issues in turning of Al-SiC (10p) metal matrix composites," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 39, no. 3-4, pp. 211-218, 2008.
- [152] N. M. Krishnan, D. Vikram, S. Kaushik, et K. P. Rao, "An investigation on the machining behaviour of metal matrix composites by using PCD inserts," in *2005 World Tribology Congress III, Washington, D.C., United states*, 2005, pp. 811-812.
- [153] Y. Sahin, "The effects of various multilayer ceramic coatings on the wear of carbide cutting tools when machining metal matrix composites," *Surface and Coatings Technology*, vol. 199, no. 1, pp. 112-117, 2005.

- [154] I. Ciftci, M. Turker, et U. Seker, "CBN cutting tool wear during machining of particulate reinforced MMCs," *Wear*, vol. 257, no. 9-10, pp. 1041-6, 2004.
- [155] A. Kremer et M. El Mansori, "Influence of nanostructured CVD diamond coatings on dust emission and machinability of SiC particle-reinforced metal matrix composite," *Surface and Coatings Technology*, vol. 204, no. 6-7, pp. 1051-1055, 2009.
- [156] R. M. Hooper, J. L. Henshall, et A. Klopfer, "Wear of polycrystalline diamond tools used in the cutting of metal matrix composites," vol. 17, no. 1, pp. 103-109, 1999.
- [157] S. Durante, G. Rutelli, et F. Rabezzana, "Aluminum-based MMC machining with diamond-coated cutting tools," *Surface and Coatings Technology*, vol. 94-95, pp. 632-640, 1997.
- [158] D. Ge et M. Gu, "Mechanical properties of hybrid reinforced aluminum based composites," *Materials Letters*, vol. 49, no. 6, pp. 334-339, 2001.
- [159] A. E. M. Warner, J. A. E. Bell, et T. F. Stephenson, "Opportunities for new graphitic aluminium metal matrix composite," in *Metal Matrix Composites VI, London, UK*.
- [160] S. W. Ip, R. Sridhar, J. M. Toguri, T. F. Stephenson, et A. E. M. Warner, "Wettability of nickel coated graphite by aluminum," *Materials Science and Engineering A*, vol. A244, no. 1, pp. 31-38, 1998.
- [161] P. Schimmerling, J. C. sisson, et A. Zaïdi, *Pratique des plans d'expériences: TECHNIQUE & DOCUMENTATION*, 1998.

- [162] R. L. Mason, R. F. Gunst, et J. L. Hess, "Statistical Design and Analysis of Experiments," John Wiley & sons, Inc., 2003.
- [163] G. Baillargeon, *MÉTHODES TAGUCHI*, Trois-Rivières: LES ÉDITIONS SMG, 1993.
- [164] *Standard Handbook of Engineering Calculation*, T. G. Hicks, Éd McGraw-Hill, 2009  
 Disponible:  
[http://www.knovel.com/web/portal/basic\\_search/display?\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_bookid=2352&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_fromSearch=true&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_Page=1&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_sistring=0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;82238;;;-2;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_ststring=machining%20cost;;;0;;;0;;;0;;;0&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_searchType=basic](http://www.knovel.com/web/portal/basic_search/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2352&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_fromSearch=true&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_Page=1&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_sistring=0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;82238;;;-2;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_ststring=machining%20cost;;;0;;;0;;;0;;;0&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_searchType=basic).
- [165] D. G. Newnan, T. G. Eschenbach, et J. P. Lavelle, *ENGINEERING ECONOMIC ANALYSIS*, 9<sup>e</sup> éd., New York: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2004.
- [166] M. S. BAZARAA, H. D. SHERALI, et C. M. SHETTY, *NONLINEAR PROGRAMMING Theory and Algorithms*, 3<sup>e</sup> éd., New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC., 2006.
- [167] K. Lingaiah, *Machine Design Databook (2nd Edition)*, McGraw-Hill, 2003. Disponible:  
[http://www.knovel.com/web/portal/basic\\_search/display?\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_bookid=1630&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_fromSearch=true&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_Page=1&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_sistring=0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;82238;;;-2;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_ststring=machining%20cost;;;0;;;0;;;0;;;0&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_searchType=basic](http://www.knovel.com/web/portal/basic_search/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=1630&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_fromSearch=true&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_Page=1&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_sistring=0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;82238;;;-2;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_ststring=machining%20cost;;;0;;;0;;;0;;;0&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_searchType=basic).

[168] T. H. C. M. Childs, K.; Obikawa, T.; Yamane, Y., *Metal Machining - Theory and Applications*, Elsevier, 2000. Disponible:

[http://www.knovel.com/web/portal/basic\\_search/display?\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_bookid=435&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_fromSearch=true&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_Page=1&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_sistring=0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;82238;;;-2;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_ststring=machining%20cost;;;0;;;0;;;0;;;0&\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_searchType=basic](http://www.knovel.com/web/portal/basic_search/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=435&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_fromSearch=true&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_Page=1&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_sistring=0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;82238;;;-2;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0;;;0&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_ststring=machining%20cost;;;0;;;0;;;0;;;0&_EXT_KNOVEL_DISPLAY_searchType=basic).